SCHULEXPERIMENTE ZUM DUALISMUS DES LICHTS

Wissenschaftliche Prüfungsarbeit im Fach Physik

im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien

vorgelegt von:

Christian Vogl

Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Institut für Physik

Gutachter:

Prof. Dr. H.-G. Sander

Prof. Dr. L. Köpke

Vorgelegt im September 2003

Inhalt

Einleitung

Das Licht fasziniert Wissenschaftler und Forscher seit Menschengedenken. Die Frage nach dem Wesen des Lichts stellt sich auch im Physikunterricht der Oberstufe. In der vorliegenden Arbeit werden drei Demonstrationsexperimente zum Dualismus des Lichts vorgestellt, die sich zum Einsatz in der Schule eignen.

In zwei Basisversuchen werden die zwei grundlegenden Charaktere des Lichts experimentell dargestellt. Mit Hilfe eines Photomultipliers und einer angeschlossenen Elektronik werden Photonen eines abgeschwächten Laserstrahls hörbar gemacht. Das Auftreffen der Photonen am Einlassfenster des Photomultipliers wird durch Audio-Signale angezeigt. Das Licht zeigt in diesem Versuch seinen Teilchencharakter. Der Wellencharakter wird in den Resultaten des zweiten Basisversuches deutlich. Der Laserstrahl wird an verschiedenen Spalten gebeugt und erzeugt Interferenzmuster auf dem Schirm. Der Teilchen- und der Wellencharakter des Lichts bilden historisch die Basis des Dualismusprinzips. Physiker versuchen damit die Natur des Lichts umfassend zu erklären. Allerdings erscheinen die Eigenschaften des Lichts zu vielfältig, als dass eine Reduktion auf die Verknüpfung zweier scheinbar konträrer Modelle dem Sachverhalt Rechnung trägt.

Im Hauptversuch werden mehrere Facetten der Natur des Lichts experimentell dargestellt. Das Doppelspaltexperiment wird mit einzelnen Photonen durchgeführt, die mit einem Bildverstärker und einer Digitalkamera visualisiert werden. Jeder einzelne Photonentreffer zeigt den Teilchencharakter des Lichts und dennoch entsteht aus der Vielzahl der einzelnen Treffer ein für den Wellencharakter typisches Interferenzmuster. Die einzelnen Photonen zeigen dabei auch stochastisches Verhalten. Die verschiedenen Charaktere des Lichts werden in einem Versuchsaufbau gleichzeitig sichtbar.

Die Experimente, die auf einer Aufstellungsarbeit zum „Jahr der Physik 2000“ des Instituts für angewandete Physik der Universität Bonn[1] basieren, sind für den Einsatz in der Lehre an Schulen und der Universität optimiert worden. Mögliche Einsatzfelder werden am Ende der Arbeit vorgestellt. Die Experimente sollen helfen, beim Lernenden Interesse für die „Faszination Licht“ zu wecken.

---

[1] [We00]

I. Die Natur des Lichts im naturwissenschaftlich-historischen Kontext

1. Die Anfänge der Geometrischen Optik: Die Rolle des Lichts in den Hochkulturen des Altertums und die Entwicklungen im Mittelalter

1.1. Die Flusskulturen Babylon und Ägypten

In der geometrischen Optik werden die Lichtphänomene mit Hilfe von Lichtstrahlen erklärt. Kern der Untersuchungen sind der Verlauf und das Verhalten dieser Lichtstrahlen. Die ältesten Forschungen auf dem Gebiet der Optik sind aus der *babylonischen* Hochkultur überliefert. In Dokumenten, die auf den Zeitraum um 2000 v. Chr. datiert werden, finden sich Beschreibungen astronomischer Forschungen. In diesen Quellen wird von einer geradlinigen Ausbreitung der Lichtstrahlen ausgegangen.

In der *ägyptischen* Hochkultur war der Sonnengott Re der König der Götter. Das Licht (der Sonne) spielte somit auch in der Glaubenswelt der Ägypter eine große Rolle. Den Gelehrten war die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen bekannt. Im Vordergrund standen optische Naturphänomene. Die Ägypter berechneten zum Beispiel mit Hilfe der Länge der Pyramidenschatten die Höhe des Sonnenstandes. Diese praktischen Anwendungen standen im Mittelpunkt der naturwissenschaftlichen Forschungen über das Phänomen Licht. Weder in babylonischen noch in ägyptischen Quellen finden sich Abhandlungen über das Wesen des Lichts aus naturwissenschaftlicher Sicht.

1.2. Die hellenistische Hochkultur

Ab dem 6. Jhd. v. Chr. entwickelt sich in *Griechenland* eine wissenschaftliche Behandlung der Optik. Die naturwissenschaftlichen Werke griechischer Lehrmeister behandeln ausschließlich Probleme der geometrischen Optik. Seit Geminos (1. Jhd. v. Chr.) wird zwischen den Teilgebieten Optik, Katoptrik, Skenographie, und Dioptrik unterschieden. Die Optik als die Lehre

vom Sehen wird in Euklids Buch „Optik“ (um 300 v. Chr.) ausführlich beschrieben. Die Kaoptrik ist die Lehre von der Reflexion. Das Reflexionsgesetz ist schon bei Euklid bekannt und findet Erwähnung in Werken von Archimedes, Ptolemäus und Heron. Ptolemäus erstellt Brechungstabellen, kennt aber noch kein Brechungsgesetz. Dieses findet man erstmalig bei Heron (um 60 n. Chr.). Die Gesetze der Perspektive, die in der Skenographie behandelt werden, finden Anwendung bei dem römischen Architekten Vitruv, dessen architekturtheoretisches Werk aus der Zeit um 30 v. Chr. überliefert ist. In der Dioptrik wird die Winkelmessung mit dem Diopter, dem ersten Universalmessinstrument, beschrieben.

Alle Fragen über das Wesen des Lichts ordneten die Griechen der Philosophie zu. Obwohl die philosophischen Abhandlungen über die Natur des Lichts von einem sehr spekulativen Charakter geprägt sind, haben die griechischen Theorien Bedeutung bis weit in die Neuzeit. Die wichtigsten Lichttheorien der griechischen Philosophen sind:

- die Sehstrahlentheorie
- die stoische Theorie
- die epikurische Theorie
- die Theorie Platons.

Nach der *Sehstrahlentheorie*, welche unter anderem von Pythagoras (um 500 v. Chr.) vertreten wurde, sendet das Auge geradlinig Sehstrahlen aus. Diese treffen auf den gesehenen Körper und der dort erlittene Aufprall wird vom Auge registriert. Das Medium zwischen Auge und Gegenstand spielt keine Rolle. Die Sehstrahlen werden als divergent beschrieben, d.h. mit zunehmender Entfernung vom Auge wird der Abstand zwischen zwei Strahlen größer. Dadurch können weit entfernte Gegenstände nicht mehr wahrgenommen werden, da sie sich im Zwischenraum zwischen den Strahlen befinden. Euklid erklärt in seinem Buch „Optik“ die Ausbreitung der Sonnenstrahlen mit Hilfe der Sehstrahlentheorie.

Die *stoische Theorie* postuliert eine Spannung in der Luft. Von einem seelischen Zentralorgan, Hegemonikon genannt, gelangt ein so genanntes Sehpneuma aus dem Inneren des Menschen in die Pupille und erregt von dort aus eine Spannung in der Luft, welche sich kugelförmig ausbreitet. Diese Spannung kann nur in verdünnter Luft fortgeleitet werden. Die Verdünnung erfolgt z.B. durch Sonnenstrahlen. In der Dunkelheit fehlt diese Verdünnung und der Widerstand der Luft steigt. Die Spannung kann dann nur noch auf kurze Distanz fortgepflanzt werden.

Die *epikurische Theorie* basiert auf „Abbildern“. Von der Oberfläche der betrachteten Körper lösen sich beständig Teilchen ab, welche als Abbild des Gegenstands die Luft nach allen Seiten durcheilen. Die weitmaschigen Abbilder finden nur geringen Widerstand in der Luft. Sie dringen in das Auge ein und erregen den Sehnerv. Hier findet sich erstmals ein Ansatz zu einer Teilchentheorie des Lichts.
Platon (um 400 v. Chr.) geht von einem Feuer im menschlichen Körper aus. Das Feuer strömt durch die Pupille bei geöffnetem Auge nach außen. Das Licht dieses Feuers trifft auf das Sonnenlicht. Bei dieser Begegnung entsteht ein Lichtkörper mit dem Platon die Empfindung des Sehens erklärt. In der Dunkelheit fehlt die Begegnung mit dem Sonnenlicht. Daher kann kein Lichtkörper entstehen und die Sehempfindung bleibt aus.

1.3. Die Entwicklungen im Mittelalter

Auch die *arabische Kultur* verfügte über weitreichende physikalische Kenntnisse im Bereich der Optik, teilweise dank der Übersetzungen der alten griechischen Schriften. In einem umfangreichen Werk von Ibn Al Haitham (genannt Alhazen, 965-1039 n. Chr.) finden sich erste exakte Beschreibungen über den Bau und die Funktionsweise des menschlichen Auges. Behandelt werden Lichteigenschaften wie Helligkeit, Reflexion und Brechung bis hin zu optischen Täuschungen. Er lehnt die Lehre der Sehstrahlen ab. In seiner Theorie sendet jeder Punkt eines leuchtenden oder beleuchteten Gegenstands Lichtstrahlen nach allen Seiten aus. Die Lichtstrahlen breiten sich geradlinig mit endlicher Geschwindigkeit aus. In Alhazens Werk findet sich auch eine Beschreibung des „Camera obscura“ -Prinzips.
Im 13. Jhd. baut der Franziskanermönch Roger Bacon (1214-1294) die Camera obscura, den Vorläufer der Lochkamera. Er benutzt diese zu Beobachtungen anlässlich einer Sonnenfinsternis. Die Untersuchungen dieser Zeit behandeln häufig Naturerscheinungen.
Aus dem Jahr 1575 ist ein größeres optisches Werk von Franciscus Maurolycus (1494-1575) überliefert. Sein Werk „Photismi de lumine et umbra“ – über das Licht und den Schatten - stellt eine Sammlung bis dahin gesicherter Kenntnisse auf dem Gebiet der Optik dar.
Die Quellen aus dem Mittelalter behandeln optische Phänomene. Abhandlungen über das Wesen des Lichts, wie sie bei den griechischen Philosophen noch zu finden sind, sucht man dort vergebens.

2. Theorien über die Natur des Lichts - von Kepler bis Michelson

2.1. Johannes Kepler: Vater der modernen Optik

Im 17. Jahrhundert entstehen die ersten Lichttheorien, welche eine umfassende Vorstellung über die Natur des Lichts postulieren. Sie geben eine umfassende Beschreibung und Deutung der bei der Entstehung und Ausbreitung des Lichts beobachteten Phänomene.

Der deutsche Astronom *Johannes Kepler* (1571-1630)[2] gilt als Begründer der modernen Optik. In seinem Werk „Astronomia Pars Optica“, veröffentlicht 1604, behandelt Kepler eine Fülle optischer Fragestellungen. Den ersten Teil, der Fragen der reinen Optik zum Schwerpunkt hat, beginnt er mit einem Kapitel über die Natur des Lichts. Das Licht ist für Kepler ein von Gott geschaffenes Mittel zur Formulierung und Belebung aller Dinge. Ferner schreibt er über Experimente mit der Lochkamera und mit Spiegeln. Für Kepler gehen unendliche Lichtstrahlen von jedem Punkt einer Lichtquelle in alle Richtungen aus. Seine Vorstellung über das Wesen des Lichts ähnelt der Vorstellung des Arabers Ibn Al Haitham. Kepler beschäftigt sich auch mit dem Brechungsgesetz, das Thomas Harriot (1560-1621) als geometrische Abbildungsvorschrift formulierte und das heute nach Willebrod Snellius (1591-1626) benannt wird.

Im zweiten Teil der „Astronomia Pars Optica“ behandelt Kepler praktische Anwendungen seiner Lehre der reinen Optik auf dem Gebiet der Astronomie. Er beschreibt unter anderem verschiedene Lichterscheinungen einzelner Himmelskörper. Mit diesem Werk legt Kepler die Grundlage für die neue Behandlung der Optik.

2.2. Die Teilchentheorie des Lichts nach Isaac Newton

Im Jahr 1675 veröffentlichte *Sir Isaac Newton* (1643-1727)[3] in seinem Werk „A Hypothesis explaining the properties of light“ erstmals eine Korpuskeltheorie des Lichts. Wegen eines Prioritätenstreits mit seinem Landsmann Robert Hooke (1635-1703) wartete Newton bis zu dessen Tode, ehe er 1704 in

---

[2] Bildquelle des Portraits:www.schloss-butzbach.de/pictures/photos/archiv/kepler.jpg
[3] Bildquelle des Portraits:http://scienceworld.wolfram.com/biography/Newton.html

„Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light" einen umfassenden Überblick seiner Überlegungen zu optischen Problemen gibt.

Sein Ziel ist es, die Eigenschaften des Lichts nicht wie in der griechischen Tradition durch Hypothesen, sondern durch Argumente und Experimente zu erklären. Newton definiert Licht am Beginn seines Werkes: „For it is manifest that Light consists of Parts, both Successive and Contemporary" [Ne52, S.1] Er behandelt Licht als einen Strom zeitnah aufeinander folgender dahinfliessender Teilchen. Die Newtonsche Lichttheorie wird daher allgemein auch als *Teilchen-* oder *Korpuskulartheorie* bezeichnet. Die Teilchen gehen geradlinig von einer Lichtquelle aus und breiten sich mit großer Geschwindigkeit im Raum aus. Seine Gedanken zur Natur des Lichts hat Newton in Form von Fragen und Antworten im dritten Buch seiner „Opticks" aufgeschrieben. So formuliert er in Frage 29: „Are not the Rays of Light very small Bodies emitted from shining Substances?" [Ne52, S.370] Experimentell sieht er seine Theorie durch den Schattenwurf des Lichts bestätigt. Während Wasser- oder Schallwellen, die an Hindernissen gebeugt werden, nach der Beugung unregelmäßige Strukturen zeigen, entsteht beim Schattenwurf des Lichts eine scharfe Grenze. „For such Bodies will pass through uniform Mediums in right Lines without bending into the Shadow, which is the nature of the Rays of Light.[4].

Newton untersuchte auch verschiedene Interferenzstrukturen, unter anderem die nach ihm benannten Newtonschen Ringe. Diese entstehen zum Beispiel, wenn man eine flache Konvexlinse auf einen Spiegel legt und mit Licht beleuchtet. Zum Teil wird das Licht an der Oberseite reflektiert, zum Teil an der Unterseite. Das reflektierte Licht überlagert sich. Bei der Verwendung von weißem Licht entstehen farbige Ringe, bei monochromatischem Licht entstehen helle und dunkle Ringe. Diese Beobachtungen konnte Newton nicht mehr mit seiner ursprünglichen Korpuskulartheorie erklären. Deshalb erweiterte er seine Teilchentheorie und erklärte das entstehende Muster als Resultat einer periodischen Teilchenbewegung. Die Periodizität führt er auf anziehende und abstoßende Kräfte in den von Licht durchdrungenen Materialen zurück. Die Lichtteilchen lösen Wellen aus. Diese Wellen sollten nach Newtons Vorstellung die Teilchen verschieden stark beschleunigen. An dieser Stelle spielen somit auch in Newtons Lichttheorie Wellen eine Rolle, wenn auch nicht im Huygens´schen Sinne.

---

[4] Antwort auf Frage 29 in Buch 3; entnommen aus [Ne52, S.370]

Isaac Newton war mit dieser Vorstellung über das Zusammenspiel des Korpuskularen und Wellenartigen nicht weit von der später als *Dualismus des Lichts* bezeichneten Theorie entfernt. Die nachfolgenden Generationen interpretierten Newtons Theorie allerdings meist einfacher und gingen nur noch von einem Strom glatter Kugeln aus.

Newton betonte stets, dass sein „Teilchen"-Modell nur eine Veranschaulichung der Natur des Lichts sei und als eine Theorie unter mehreren anzusehen ist. Er kannte und respektierte auch die Forschungen und Theorien seines Zeitgenossen Christiaan Huygens.

2.3. Die Wellentheorie des Lichts nach Christiaan Huygens

Konträr zur Newtonschen Teilchentheorie entwickelte der Niederländer *Christiaan Huygens* (1629-1695)[5] eine Wellentheorie des Lichts. Im Jahre 1678 referierte Huygens bereits über seine Lichttheorie vor der Königlichen Akademie der Wissenschaften in Paris. Allerdings veröffentlichte er seine Ideen erst 1690 in seiner Abhandlung über das Licht „Tractatus le lumine". Im ersten Kapitel dieses Werkes schreibt Huygens „Über das Licht". Seine „Beweisführungen in der Optik gründen sich (...) auf Wahrheiten, welche aus der Erfahrung abgeleitet sind."[Hu64, S.9] Als Beispiel nennt Huygens die geradlinige Ausbreitung des Lichts und das Brechungsgesetz. Licht besteht für ihn aus der Bewegung einer gewissen Materie zwischen dem Betrachter und dem leuchtenden Körper. Dies zeigt sich z. B. bei der Lichterzeugung durch Kerzen, deren Flammen „ohne Zweifel in rascher Bewegung befindliche Körper enthalten". [Hu64, S.10] Um die Physik zu begreifen, sollte man „die Ursache aller natürlichen Wirkungen auf mechanische Gründe zurückführen" [Hu64, S.10] Basierend auf dieser Philosophie führt Huygens die Wahrnehmung des Lichts durch unser Auge auf „den Eindruck einer gewissen Bewegung eines Stoffes (...), der auf die Nerven im Grunde unserer Augen wirkt" zurück. [Hu64, S.11] Allerdings kann dies nicht auf die direkte Übertragung einer Materie vom Objekt zum Auge geschehen, wie dies z.B. bei einem Geschoss oder einem Pfeil der Fall wäre. Die „außerordentliche Geschwindigkeit, mit welcher sich Licht nach allen Richtungen ausbreitet" [Hu64, S.11] spricht ebenso dagegen, wie die ungestörte Durchdringung zweier verschiedener Lichtstrahlen. Auf der Suche nach einer anderen möglichen Ausbreitungsart zieht Huygens

---

[5] Bildquelle des Portraits: www.stetson.edu/~efriedma/periodictable/html/Hg.html

Vergleiche zur Ausbreitung des Schalls in Luft. Schall breitet sich durch eine Bewegung aus, „welche allmählich von einem Luftteilchen zum anderen fortschreitet.“ [Hu64, S.11] Die Ausbreitung erfolgt ohne Bewegung der Luftteilchen selbst. Sie ist nach allen Seiten gleich schnell, wobei sich Kugelflächen bilden. Diese wellenartige Bewegung sieht Huygens auch bei Licht gegeben. Das Licht gelangt durch eine Bewegung, welche der Materie mitgeteilt wird, zu uns. Da das Licht für seinen Weg Zeit braucht, kann man von einer allmählichen Bewegung ausgehen. Huygens spricht bei der Beschreibung dieser Bewegung von „Wellen wegen der Ähnlichkeit mit jenen, welche sich im Wasser beim Hineinwerfen eines Steines bilden“. [Hu64, S.11] Dies ist historisch gesehen die erste Beschreibung des Lichts als Wellenbewegung.

Die Unterschiede zwischen Schall und Licht liegen in der Erzeugung der Bewegung, der Art der Fortpflanzung, dem Mittel, in welchem sich die Bewegung fortpflanzt und in der Geschwindigkeit der Welle. Die Ausbreitung des Schalls findet in der Luft, welche wir fühlen, spüren und atmen können statt. Die Schallwellen werden durch eine plötzliche Erschütterung eines Körpers erzeugt und breiten sich durch die Kompression und Dekompression der Luft aus. Entzieht man dem Raum die Luft, ist kein Schalltransport mehr möglich. Das Licht wird aber weiterhin ungestört transportiert. Dies überprüfte Huygens durch Experimente mit der gerade von Boyle erfundenen Vakuumpumpe. Daher kann „die Materie, in welcher die von den leuchtenden Körpern kommende Bewegung sich ausbreitet“ nicht die Luft sein, sondern eine andere Materie, welche Huygens als Äther bezeichnet. [Hu64, S.17] Er beschreibt den Äther als aus sehr kleinen Teilchen zusammengesetzt. Diese müssen keineswegs kugelförmig sein. Huygens schreibt ihnen aber eine vollkommene Härte und eine sehr hohe Elastizität zu. Die Fortpflanzung des Lichts „besteht nicht in der Fortbewegung dieser Teilchen, sondern nur in einer geringen Erschütterung, welche sie (...) auf die umgebenden Teilchen zu übertragen gezwungen sind.“ [Hu64, S.21] Er vergleicht die Fortbewegung mit der Art und Weise mit der sich „harte Körper ihre Bewegung einander mitteilen“ [Hu64, S.18] Aufgrund der Elastizität schnellen die Teilchen nach einem Stoß in ihre Ausgangsposition zurück. Dadurch erfolgt das Fortschreiten der Welle *longitudinal* mit der immer gleichen Geschwindigkeit. Christiaan Huygens erwähnt in seiner Abhandlung Ole Römers Messungen der Lichtgeschwindigkeit durch Beobachtung der Jupitermonde. „Die Lichtgeschwindigkeit ist also mehr als 600.000-mal so groß, als die Schallgeschwindigkeit.“ [Hu64, S.16] Es liegt also

auch beim Licht keine augenblickliche Bewegung mit unendlich schneller Geschwindigkeit vor, sondern eine allmähliche Bewegung. „Die Lichtbewegung (...) muss von jedem Punkte des leuchtenden Gegenstandes ausgehen, damit man alle verschiedenen Teile dieses Gegenstandes wahrnehmen könne“ [Hu64, S.16] Huygens sieht in jeder kleinen Stelle eines leuchtenden Körpers einen Ausgangspunkt einer Welle, deren Mittelpunkt diese Stelle ist. Die Ausbreitung dieser Wellen erfolgt nach diesem Prinzip, welches später nach Huygens und Fresnel benannt wurde:

„In jedem Punkt einer Wellenfront sitze ein Streuzentrum, von dem wieder eine Kugelwelle ausgeht. Alle diese Kugelwellen überlagern sich dann zu einer neuen Wellenfront.“ [Ge95, S.172]

Bei der Fortpflanzung der Welle teilt jedes Teilchen nicht nur dem in gerader Linie liegenden Teilchen die Bewegung mit, sondern allen benachbarten Teilchen. Obwohl die Ätherteilchen nach Huygens Theorie ohne erkennbare Ordnung nebeneinander liegen, breitet sich das Licht stets geradlinig aus. Jedes Teilchen ist Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Allerdings muss „jeder Wellenteil sich in der Weise ausbreiten (...), dass seine äußersten Grenzen immer zwischen den vom leuchtenden Punkte aus gezogenen Linien bleiben.“ [Hu64, S.24] Aus den Fronten der Einzelwellen lässt sich eine die Bewegung abgrenzende Welle bilden. Die Wellen, die von einem leuchtenden Objekt ausgehen, vereinigen sich zu einer einzigen Welle.

Die aus verschiedenen Richtungen kommenden Wellen durchkreuzen sich ungestört. Ein Ätherteilchen kann dabei mehrere Wellen aus verschiedenen Richtungen ungestört fortpflanzen. Sich durchdringende Lichtstrahlen üben keine Wirkung aufeinander aus. Daher können zwei Personen durch eine kleine Öffnung ungestört voneinander verschiedene Gegenstände betrachten. Christiaan Huygens behandelte die Lichtwellen in seiner Theorie aufgrund der Analogie zu den Schallwellen als *longitudinale* Schwingungen.

Auch Robert Hooke, bekanntlich einer der schärfsten Rivalen Newtons, betrachtete in seinem Werk „Mikrographia“ (1665) Licht als Wellenbewegung. Experimentell beschäftigte er sich mit Farberscheinungen an dünnen Schichten und erklärte diese mit der Wellentheorie Huygens´. Allerdings vermutete er anderes als Huygens *transversale* Wellen.

Zu Beginn des 18. Jahrhundert standen sich somit Huygens´ Wellentheorie und Newtons Teilchentheorie konträr gegenüber. Aufgrund der großen Popularität und Autorität, die Isaac

Newton unter den europäischen Physikern genoss, setzte sich die Korpuskulartheorie als Lehrmeinung in Europa durch. Die Wissenschaftshistoriker[6] bewerten Newtons „Opticks“ im Vergleich zur „Abhandlung über das Licht“ von Huygens als das sprachlich und fachlich ausgereiftere Buch. Die Entwicklung der Lichttheorien stagnierte im 18. Jahrhundert auf dem Stand einer teilweise vereinfachten Teilchentheorie. Die Rückwendung zur Undulationstheorie[7] erfolgt erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts.

2.4. Der experimentelle Nachweis des Wellencharakters - Das Youngsche Doppelspaltexperiment

Der Engländer *Thomas Young* (1773-1829)[8] beschreibt das Licht als Abfolge periodischer Wellenzüge. Er berichtet in drei Veröffentlichungen in den „Philosophical Transactions“ der Royal Society von einem neuen fundamentalen Prinzip: der Interferenz.

„Nehmen wir an, ein Zug gleichartiger Wellen auf der Oberfläche eines stehenden Gewässers pflanze sich mit konstanter Geschwindigkeit fort und gerate in einen engen Kanal, der aus dem Gewässer herausführt. Nehmen wir weiter an, eine ähnliche Ursache rege einen weiteren, ähnlichen Wellenzug an, der mit gleicher Geschwindigkeit und gleichzeitig zum selben Kanal gelangt, wie der erste. Es wird dann keiner der beiden Wellenzüge den anderen vernichten, vielmehr ihre Wirkung vereint zur Geltung kommen: treten sie dermaßen in den Kanal ein, dass die Wellenberge des einen Zuges mit denen des anderen zusammenfallen, so ergibt sich ein Wellenzug mit höheren Bergen; wenn hingegen die Wellenberge des einen Zuges auf die Wellentäler des anderen zu liegen kommen, so füllen sie diese letzteren genau auf. Die Oberfläche des Wassers bleibt glatt.(...) Nun behaupte ich, dass es zu eben solchen Effekten kommt, wenn auf dieselbe Art zwei Wellenzüge des Lichts vermischt werden, und ich will dies das allgemeine Gesetz der Interferenz des Lichts nennen.“[9]

Grundlegende Bedingung zur Beobachtung von Interferenzphänomenen ist die Kohärenz der sich überlagernden Wellenzüge. Thomas Young spricht von der Überlagerung ähnlicher Wellenzüge. Aufgrund der mangelnden Kohärenz der im 18. Jahrhundert bekannten Lichtquellen wurden Interferenzerscheinungen selten beobachtet. Mit Hilfe seines *Doppelspaltexperiments* gelang Thomas Young der experimentelle Durchbruch. Er konnte die Welleneigenschaften des Lichts einwandfrei nachweisen. Er benutzte dazu einen lichtundurchlässigen

[6] Bernhard Cohen im Vorwort zu [Ne52], S. xii
[7] Undulationtheorie = Wellentheorie; unda (lat.) : Welle
[8] Bildquelle des Portraits: http://scienceworld.wolfram.com/biography/Young.html
[9] Thomas Young in “Miscellaneous Works”. Vol.1; entnommen aus [Si90, S.355]

Schirm in dem sich zwei kleine spaltartige Öffnungen befanden, den so genannten Doppelspalt. Jeder dieser Spalte stellt nach dem Huygens´schen Prinzip einen Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle dar. Damit lässt sich theoretisch begründen, weshalb Licht nach dem Durchgang durch den Doppelspalt in den geometrischen Schattenraum eindringen kann. Man spricht auch von Beugung am Doppelspalt. Seinen Doppelspalt beleuchtete Thomas Young mit monochromatischem Licht. Die sich überlagernden Teilwellen haben daher die gleiche Frequenz. Bei unterschiedlichen Frequenzen der Teilwellen können Schwebungen entstehen, die ein „Auswaschen" der Interferenzstruktur verursachen können. Da beide Spalte mit Licht derselben Lichtquelle beleuchtet werden, ist die Phasendifferenz zwischen den Teilwellen an jedem Ort im Überlagerungsgebiet zeitlich konstant. Diese Wellen nennt man räumliche kohärent. Die Phasendifferenz ist abhängig von den unterschiedlich langen Wegstrecken, die die Teilwellen bis zum Ort der Überlagerung zurückgelegt haben. Man spricht auch von Gangunterschied. Da man von endlichen Wellenzügen ausgeht, kann der Fall eintreten, dass der Wegunterschied zweier Teilwellen größer als die Länge des Wellenzuges ist. Diese beiden Teilwellen verfehlen einander oder können sich daher nicht überlagern. Man bezeichnet die Länge der Wellenzüge auch als Kohärenzlänge. Die Kohärenzlänge muss stets größer als der Gangunterschied sein, damit die Bedingungen für Kohärenz[10] der Teilwellen erfüllt sind [Ge95, S.514]. Aufgrund der unterschiedlich langen Lichtwege von der Quelle zu den Spalten bestehen zwischen den Wellen Gangunterschiede. Sie sind gegeneinander phasenverschoben. Im Gebiet hinter den Öffnungen überlagern sich die Teilwellen und erzeugen auf einem dort aufgestellten Schirm ein Hell-Dunkel-Muster, welches ähnlich dem Muster sich überlagernder Wasserwellen ist. Young benennt als Ursache dieses Musters die Interferenz. Je nach Gangunterschied der sich überlagernden Wellen verstärken sich die beiden Wellen oder löschen sich gegenseitig aus. Im ersten Fall spricht man von konstruktiver Interferenz. Zwei Wellenberge fallen aufeinander, d.h. entweder ist der Punkt gleich weit von beiden Spalten entfernt oder die Entfernung unterscheidet sich um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge.

---

[10] cohaerentia (lat.): Zusammenhang

Für den Gangunterschied g gilt:

$$g = d \cdot \sin j \qquad (1)$$

wobei d der Abstand zwischen Spalt A und Spalt B ist (Abb.1).

Mit der Bedingung für ein Interferenzmaximum ergibt sich:

$$g = d \cdot \sin j = z \cdot l \qquad (2)$$

mit z = 0, +/-1, +/-2,… und λ gleich der Wellenlänge des verwendeten Lichts.

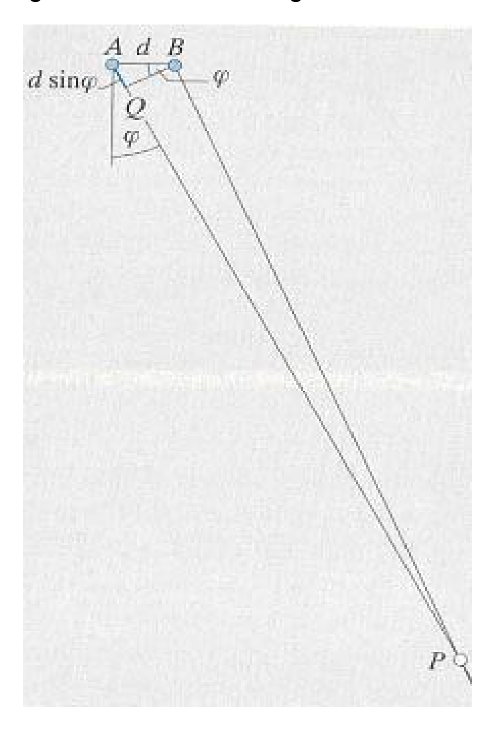


Abbildung 1: Gangunterschied beim Doppelspaltversuch[11]

Mit Formel (2) können die Lagen der Interferenzmaxima berechnet werden. Die einzelnen Maxima werden je nach z-Wert als nulltes, erstes, zweites, usw. Maximum bezeichnet. Bei der konstruktiven Interferenz ist die Amplitude der resultierenden Welle gleich der Summe der beiden Amplituden der ursprünglichen Wellen.

Im zweiten Fall, der destruktiven Interferenz, fällt ein Wellenberg auf ein Wellental. Die Amplitude der resultierenden Welle ist gleich der Differenz der beiden Amplituden der ursprünglichen Wellen. Daher löschen sich die beiden Wellen teilweise aus. Die vollständige Auslöschung tritt ein, wenn die Amplituden der beiden ankommenden Wellen gleich sind. Wenn der Gangunterschied ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt, ist diese Bedingung für Interferenzminima erfüllt.

$$g = d \cdot \sin j = (z + \tfrac{1}{2})\, l \qquad (3)$$

---

[11] Bildquelle: [Ge95, S. 515]

Durch das Nebeneinander von konstruktiver und destruktiver Interferenz ergibt sich auf dem Schirm das charakteristische Hell-Dunkelbild der Interferenzmaxima und Minima, das so genannte Interferenzmuster (in Abb.2 rechts dargestellt).

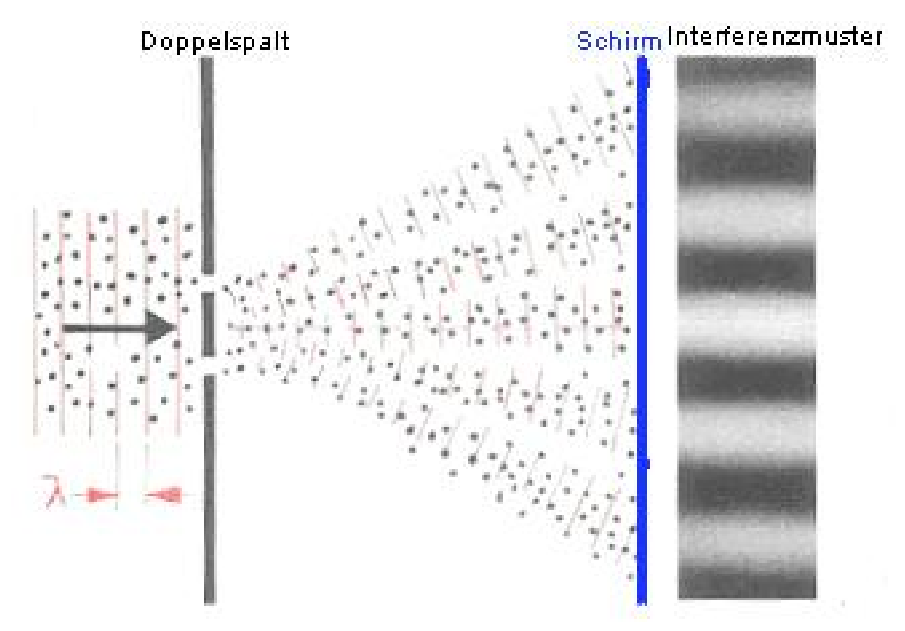


Abbildung 2: Das Interferenzmuster beim Doppelspalt[12]

Thomas Young hatte in seiner Heimat England gegen große Widerstände zu kämpfen, da die Theorie Newtons hohes Ansehen genoss. Man sprach von einem Frevel gegen die „wahre" Newtonsche Lehre.

2.5. Der Nachweis transversaler Wellen – die Polarisation des Lichts

Der französische Naturwissenschaftler *Augustin Jean Fresnel* (1788-1827)[13] verhalf der Wellentheorie des Lichts endgültig zum Durchbruch. Seine Experimente zur Interferenz des Lichts bestätigten die theoretischen Vorhersagen Huygens´. Als Quelle für kohärentes Licht nutzte Fresnel die beiden Spiegelbilder L_1 und L_2 einer monochromatischen Lichtquelle L. (Abb. 3) Experimentell wurde dies durch zwei Spiegel realisiert, welche nur um einen kleinen Winkel α geneigt sind. Bei diesem Doppelspiegelversuch lässt sich ebenfalls das charakteristische Interferenzmuster bestehend aus hellen und dunklen Streifen auf dem Schirm beobachten.

---

[12] Bildquelle: Steierischer Bildungsserver (www.physicsnet.at)
[13]Bildquelle des Portraits: http://scienceworld.wolfram.com/biography/Fresnel.html

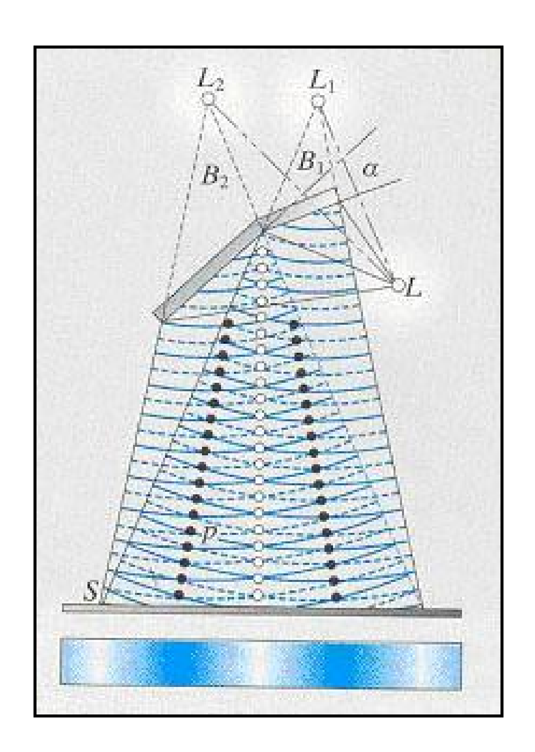


Abbildung 3: Der Fresnelsche Doppelspiegelversuch[14]

Die Natur des Lichts beschrieb Fresnel wie folgt: „Das Licht ist nichts anderes als ein bestimmter Schwingungszustand einer universellen Flüssigkeit.“ [Si90, S.350] Er ging also von einem Trägermedium der Lichtwellen aus, welches gemeinhin seit Huygens als Äther bezeichnet wird. Thomas Young hatte anderes als Huygens angenommen, dass die Ätherteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Allerdings konnte Young seine Vermutung experimentell nicht bestätigen. Augustin Fresnel gelang es Licht dergestalt zu präparieren, dass es nur noch in einer bestimmten Richtung schwingt. Man spricht von der Polarisation des Lichts. Die Polarisation des Lichts kann theoretisch nur durch eine transversale Wellenbewegung erklärt werden. Fresnel zeigte, dass zwei, in verschiedene Richtungen, polarisierte Lichtstrahlen keinerlei Interferenzeffekte zeigen. Er widerlegte damit die Vermutung von Christiaan Huygens, dass Licht analog zu den Schallwellen eine longitudinale Wellenbewegung ausführt, und bestätigte die Annahme von Young.

Bei der Polarisation wird zwischen linear, zirkular und elliptisch polarisiertem Licht unterschieden. Das „natürliche“ Licht einer Lichtquelle ist unpolarisiert, d.h. alle Polarisationsrichtungen sind gleichmäßig und ungeordnet vertreten. Mit Hilfe von Polarisatoren, z.B. Polarisationsfiltern, kann das natürliche Licht polarisiert werden. Polarisationsfilter lassen nur eine Schwingungsebene passieren. Wird nun das Licht zweier senkrecht zueinander po-

[14]Bildquelle: [Ge95, S.517]

larisierter Lichtstrahlen überlagert, so treten keine Interferenzeffekte auf. Experimentell kann dies durch zwei Polarisationsfilter realisiert werden, die je einen Spalt eines Doppelspaltes abdecken. Die Polarisationsrichtungen der Filter stehen senkrecht zueinander. Es kann kein Interferenzmuster hinter einem derart präparierten Doppelspalt beobachtet werden. (siehe auch Kapitel II.3.1)

2.6. Licht als elektromagnetische Welle – die Theorie Maxwells

Der Wellencharakter des Lichts war nun durch Young und Fresnel experimentell untermauert. Man sprach zu dieser Zeit von Lichtwellen. Im Jahre 1845 äußerte der Experimentalphysiker Michael Faraday (1791-1867) die Vermutung, dass die Lichtwellen dieselben Eigenschaften wie elektromagnetische Wellen haben. Er konnte jedoch weder einen experimentellen, noch einen theoretischen Nachweis erbringen.

Völlig unabhängig von optischen Überlegungen entwarf der Engländer *James Clerk Maxwell* (1831-1879)[15] seine Theorie des Elektromagnetismus. Hauptresultat seiner 1864 vorgestellten Überlegungen sind die so genannten „Maxwell-Gleichungen", welche das elektromagnetische Feld beschreiben. Mit Hilfe dieser Gleichungen lässt sich die Vermutung Faradays theoretisch herleiten. „Die erste und zweite Maxwell-Gleichung (aufgeschrieben für das Vakuum) haben eine ebene Welle zur Lösung, die alle Eigenschaften aufweist, die wir vom Licht erwarten." [Si90, S.352] Nach der Untersuchung der Geschwindigkeit dieser Wellen, folgerte Maxwell: „Diese Geschwindigkeit stimmt so gut mit der Lichtgeschwindigkeit überein, dass wir anscheinend allen Grund zur Annahme haben, das Licht (...) sei eine elektromagnetische Störung, die sich in Form von Wellen durch das elektromagnetische Feld, den Gesetzen des Elektromagnetismus entsprechend, fortpflanzt."[16]

Im Jahre 1888 konnte Heinrich Hertz (1857-1894) anhand seiner Dipolexperimente die Existenz der elektromagnetischen Wellen nachweisen und ihre Wesensgleichheit mit den Lichtwellen aufzeigen. Damit war die Annahme Maxwells auch experimentell bestätigt. Die Wellentheorie von Christiaan Huygens wurde weiter untermauert.

---

[15] Bildquelle des Portraits: www.physik-lexikon.de/physiker.php
[16] J.C.Maxwell: „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" in [Si90, S.356]

2.7. Das Michelson-Morley Experiment: Die Widerlegung der Äther-Theorie

In der Vorstellung der Physiker des 19. Jahrhunderts füllt der Äther den gesamten Raum aus. Er ist der Wellenträger des Lichts, sowie aller anderen elektromagnetischen Erscheinungen. Die Erde bewege sich relativ zu diesem Äther, so die Annahme. Es fehlte allerdings der experimentelle Nachweis des Äthers. Diesen wollte *Albert Michelson (1852-1931)*[17] im Jahre 1881 erbringen. In seinem Experiment sollte die Geschwindigkeit des Lichts in der Bewegungsrichtung der Erde mit der Lichtgeschwindigkeit senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde verglichen werden. Michelson erwartete aufgrund der Relativbewegung des Äthers unterschiedliche Geschwindigkeiten. Die Existenz des Äthers wäre experimentell nachgewiesen. Das Ergebnis war für Michelson aus seiner Sicht zu Beginn ernüchternd. Er wies nach, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist und in keiner Weise vom Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung des Lichts und der Bewegungsrichtung der Erde abhängt. Er hatte also das Gegenteil nachgewiesen: Es gibt keinen Äther. Sozusagen nebenbei zeigte er die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, deren Wert er 1882 sehr genau ermitteln konnte. Gemeinsam mit dem amerikanischen Chemiker Edward Morley (1838-1923) wiederholte er 1887 sein Experiment zum Nachweis der Existenz des Äthers. Als Versuchsaufbau verwendeten sie das von Michelson entwickelte Interferometer. (Abb. 4)

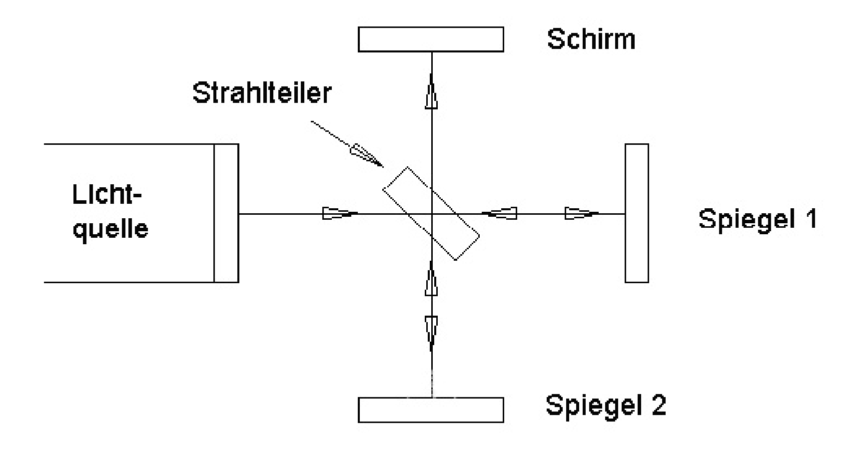


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Michelon-Morley-Interferometers

---

[17] Bildquelle des Portraits:http://physics.clarku.edu/history/michelson.png

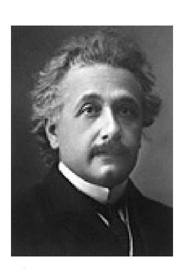
Im Interferometer wird der Lichtstrahl mit Hilfe eines Strahlteilers auf zwei senkrecht stehende Wege verteilt. Die beiden Wege sind unterschiedlich lang, und am jeweiligen Ende befindet sich ein Reflexionsspiegel. Die reflektierten Strahlen überlagern sich und es entsteht ein Interferenzmuster, das am Detektor nachgewiesen wird. Zu Beginn misst man den ersten Weg in Bewegungsrichtung des Strahles aus der Lichtquelle. Anschließend wird die Apparatur um 90 Grad gedreht und der zweite Weg vermessen. Die Lage der Interferenzstreifen hängt von dem Zeitunterschied ab, den die Teilstrahlen von der Trennplatte zu den Spiegeln und wieder zurück benötigen. Wäre die Ätherhypothese richtig, so hätten die beiden Lichtstrahlen nach der Drehung der Apparatur ihre Rollen vertauschen müssen. Dadurch würde sich das Interferenzmuster verschieben. Michelson und Morley stellten aber keinerlei Verschiebung fest. Die Ergebnisse des ersten Experiments von Michelson waren bestätigt. Für seine experimentellen Leistungen erhielt Albert Michelson 1907 den Nobelpreis für Physik.

3. Das 20. Jahrhundert – Die Natur des Lichts im quantenphysikalischen Kontext

3.1. Der Photoeffekt – die Rückbesinnung auf die Teilchentheorie

In den Jahren 1887/88 entdeckten *Heinrich Hertz* [18] und sein Schüler Wilhelm Hallwachs den Photoeffekt. Als lichtelektrischen Effekt, wie der Photoeffekt auch genannt wird, wird die Bildung und Freisetzung elektrisch geladener Teilchen aus Materie bei Bestrahlung dieser Materie mit Licht (oder allgemein mit elektromagnetischer Strahlung) bezeichnet. Beim äußeren Photoeffekt werden aufgrund der Bestrahlung mit Photonen Elektronen aus der Oberfläche eines metallischen Leiters freigesetzt. Damit rückte experimentell ein Aspekt der Lichterzeugung und Lichtverwandlung in den Mittelpunkt. Dieser Effekt konnte nicht mit der klassischen Wellentheorie erklärt werden. Die klassische Wellentheorie des Lichts eignet sich vortrefflich zur Beschreibung von Phänomenen betreffend die Lichtausbreitung und hatte gerade ihre scheinbare Vollendung in den Maxwell-Gleichungen erfahren. Hertz selbst hatte sie experimentell bestätigt. Und doch mussten sie nun wieder in Frage gestellt werden. Nach den Maxwellschen Gleichungen hätte sich die Energie der freigesetzten Elektronen kontinuierlich mit der Lichtintensität ändern müssen. Die Energie ist als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen. Dies steht nicht im Einklang mit den experimentellen Ergebnissen beim Photoeffekt.

3.2. Einsteins Lichtquantenhypothese - der theoretische Nachweis der Teilchentheorie



Erst im Jahr 1905 lieferte *Albert Einstein* (1879-1955)[19] die theoretische Erklärung des Photoeffekts. Seine Lichtquantenhypothese, für die er 1921 den Nobelpreis erhielt, publizierte er in den Annalen der Physik (Band 17) unter dem

[18] Bildquelle des Portraits: www.bingo-ev.de/~kg666/verschie/physiker/physiker.htm
[19] Bildquelle des Portraits: www.nobel.se/physics/laureates/1921/ (© The Nobel Foundation)

Titel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“:

„Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, dass sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Dispersion etc. durch das Experiment wohl denkbar, dass die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichtes zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet. Es erscheint mir nun in der Tat, dass die Beobachtungen über [...] die Erzeugung bzw. Verwandlung Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“ [20]

In dieser Hypothese greift Einstein auf die Quantentheorie von Max Planck (1858-1947) zurück. In dessen legendärem DPG-Vortrag[21] am 14. Dezember 1900, der heute oft als die Geburtsstunde der Quantenphysik bezeichnet wird, stellte Planck seine Theorie vor, dass Materie Energie nicht beliebig, sondern nur in kleinen Portionen (Quanten genannt) abgeben oder aufnehmen kann. Einstein greift diese Grundidee auf und überträgt die Energiequantelung auf die elektromagnetische Strahlung. Er postuliert *Lichtquanten*, die später den Namen Photonen erhielten. Einstein schrieb diesen Lichtquanten Teilcheneigenschaften zu und beschrieb das Licht beim Photoeffekt als eine Ansammlung von Geschossen, die auf das Metall auftreffen. Ein freies Elektron im Metall, das von einem Photon getroffen wird, absorbiert die Energie des Photons. Bei ausreichender Energie des Photons, wird das Elektron vom Metall gelöst. Die maximale kinetische Energie eines freigesetzten Elektrons E_{kin} hängt nur von der Energie der Photonen E_{γ} ab, abzüglich der benötigten Austrittsarbeit zum Verlassen des Metalls W_{aus}:

$$E_{kin} = E_g - W_{aus} \qquad (4)$$

[20] Albert Einstein: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ in „Annalen der Physik 17/1905“ entnommen aus [Le00a,S.51]

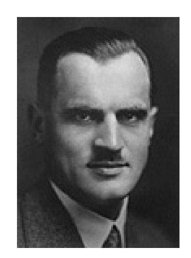
[21] DPG: Deutsche Physikalische Gesellschaft;
Titel des Vortrags: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“

Die Energie eines Photons ist ausschließlich abhängig von der Frequenz des Lichts ν und berechnet sich mit der Planck-Einstein-Beziehung:

$$E_g = h \cdot n \quad (5) \quad mit \quad \mathrm{h} = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$$

Die Konstante h wird auch Plancksches Wirkungsquantum genannt. Es treten also gemäß der Planckschen Quantenhypothese nur ganze Lichtenergiebeiträge auf. Die Energie des Lichts ist nach Einstein in den Lichtteilchen gebündelt, wobei die Art der Bündelung ursächlich von der Wellengröße „Frequenz“ abhängt.

3.3. Der Compton-Effekt - experimenteller Nachweis der Photonen



Der Amerikaner *Arthur Compton* (1892-1962)[22] untersuchte 1922 die Streuung monochromatischer Röntgenstrahlung an Kristallen. Dabei beobachtete er bei der gestreuten Strahlung einen Energieverlust bei gleichzeitiger Wellenlängenzunahme. Dies erklärte er mit dem später nach ihm benannten Compton-Effekt: Beim Zusammenstoß eines Photons mit einem Elektron überträgt das Photon einen Teil seiner Energie auf das Elektron. Mit diesem Versuch war Arthur Compton der erste experimentelle Nachweis von Photonen gelungen. Seine Ergebnisse wurden kurze Zeit später durch die Nebelkammerexperimente von Charles Wilson bestätigt. Für ihre Untersuchungen erhielten Compton und Wilson 1927 den Nobelpreis.

3.4. De Broglies Materiewellen – der vollständige Welle-Teilchen-Dualismus

Mit Hilfe der Einsteinschen Lichtquantenhypothese war dem bisher als wellenartig eingestuften Licht Teilchencharakter zugewiesen worden. Der Franzose *Louis Victor de Broglie* (1892-1981)[23] stellte 1924 in seiner Dissertation „Recherches sur la Theorie des Quanta“ eine Theorie der Materiewellen auf. Er behauptete in dieser Theorie, dass physikalische Objekte, die wir bislang als Teilchen eingestuft haben, ebenfalls Welleneigenschaften besitzen können. Diese Materiewellen, so de Broglie, blieben bisher aufgrund der sehr kleinen Wellenlänge experimentell unentdeckt. Er

---

[22] Bildquelle des Portraits: www.nobel.se/physics/laureates/1927/ (© The Nobel Foundation)

[23] Bildquelle des Portraits: www.nobel.se/physics/laureates/1929/ (© The Nobel Foundation)

vollzog also den logischen Umkehrschluss und wies Teilchenartigem einen Wellencharakter zu. Seine Theorie der Analogie von Licht und Materie rundete die bisherigen Hypothesen zu einem vollständigen Welle-Teilchen-Dualismus ab. 1929 erhielt de Broglie den Nobelpreis für „die Entdeckung der Wellennatur des Elektrons".

Die erste erfolgreiche experimentelle Umsetzung der Ideen de Broglies glückten Davisson und Germer 1927 mit Elektronenbeugung an Graphitkristallen. Für ihre Experimente erhielten sie 1937 den Nobelpreis.

3.5. Interpretation des Welle-Teilchen-Dualismus

Im Kontext der klassischen Physik, d.h. der Physik vor 1900, standen sich damit Anfang des 20. Jahrhunderts die Wellentheorie und die Teilchentheorie unvereinbar gegenüber. Je nach experimenteller Anordnung musste man die eine oder die andere Theorie zur Erklärung der auftretenden Phänomene heranziehen. Man sprach ab dieser Zeit von „Welle-Teilchen-Dualismus". Mit dem Begriff des Dualismus nahmen die Physiker eine Anleihe aus dem Bereich der Philosophie. Der Terminus umschreibt dort eine Lehre, der zufolge das Universum aus zwei verschiedenen und miteinander unvereinbaren Elementen, Zuständen oder Prinzipien besteht. Der Fall liegt im übertragenen Sinn auch bei Quantenobjekten, wie zum Beispiel einem Photon vor; es ist Welle, es ist Teilchen. Beide Theorien werden nebeneinander benutzt und sind doch in der klassischen Physik unvereinbar. Erst die Quantentheorie erlaubt eine widerspruchfreie Koexistenz beider Theorien.

Allerdings gibt es nicht die *eine* von allen Physikern als richtig anerkannte Interpretation der Quantentheorie. In den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts spaltete sich die Welt der Physiker in zwei große Lager. Auf der einen Seite die so genannten „Realisten" um Albert Einstein, die die Quantentheorie als unvollständig bezeichneten. In der Theorie fehlen „verborgene Parameter", die durch Messungen nicht zu identifizieren sind. In jedes Element der physikalischen Realität hat eine Entsprechung in der quantenphysikalischen Theorie. Die Realität wird nach Auffassung der Realisten daher durch die bekannte Quantentheorie nicht vollständig beschrieben. Es gibt für sie eine vom Beobachter unabhängige Realität.

Auf der anderen Seite steht die so genannte „Kopenhagener Deutung", die ursprünglich von Max Born entwickelt wurde und dann am Institut für Theoretische Physik an der Universität Kopenhagen unter Niels Bohr weiterentwickelt wurde. Die Kopenhagener sehen in der Quan-

tentheorie eine konsistente vollständige Beschreibung der auftretenden Phänomene. Es gibt keine tiefer liegende Realität, als die vom Beobachter abhängige Realität.

Der Diskurs zwischen Realisten und Kopenhagener gipfelte 1935 in der EPR-Debatte[24]. Es ging in einem Gedankenexperiment um der Grundfrage der Nicht-Lokalität. Während die Realisten von einem lokalen Aufbau der Welt ausgehen gehen, ist die Welt in der Interpretation der Kopenhagener nicht-lokal. Nicht-Lokalität bedeutet, dass eine lokale Beeinflussung eines Objekts stets unmittelbaren Einfluss auf den gesamten Rest des Universums hat.

John S. Bell fand 1964 mit seinen „Bellschen Ungleichungen" ein mathematisches Entscheidungskriterium zwischen Lokalität und Nicht-Lokalität. Mit den Bellschen Ungleichungen zeigt sich, dass jede lokale Theorie mit den Voraussagen der Quantentheorie in Widerspruch gerät. 1982 gelang schließlich einer Arbeitgruppe und Alain Aspect der erste experimentelle Nachweis der Nicht-Lokalität der Welt. Weitere Experimente bestätigen bislang ebenfalls diese Annahme. Nach dem heutigen Stand der Forschung erscheint die Interpretation der Kopenhagener als die Treffendere. Aber bereits Niels Bohr sagte über die unterschiedlichen Interpretationen der Quantenphysik: „Das Gegenteil einer richtigen Behauptung ist eine falsche Behauptung. Das Gegenteil einer tiefen Wahrheit kann durchaus ebenfalls eine tiefe Wahrheit sein."[Le00b]

3.6. Das Bohrsche Komplementaritätsprinzip

Niels Bohr (1885-1962)[25] erklärte den Welle-Teilchen-Dualismus mit Hilfe des so genannten Komplementaritätsprinzips: „Zwei verschiedene, auf ein und dasselbe Objekt bezogene Begriffe werden als *komplementär* bezeichnet, wenn sie zwar nicht zu einem einheitlichen Bild des Objektes zusammengefasst werden können, aber doch jeder für sich wesentliche Seiten der Gesamtheit aller Erfahrungen über das Objekt ausdrückt."[Bo58, S.26] Das Licht kann nicht gleichzeitig ein klassisches Teilchen und eine klassische Welle sein. Dennoch gilt, „weder der Begriff des Teilchens noch der der Welle darf aufgegeben werden, da beide wirkliche Erfahrungen beschreiben.

---

[24] EPR: A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, die in einer gemeinsamen Arbeit jenes Gedankenexperiment zur Nicht-Lokalität veröffentlichten, das die Grundlage der Debatte darstellt.

[25] Bildquelle des Portraits: www.nobel.se/physics/laureates/1922/ (© The Nobel Foundation)

Auch ihr Gegensatz aber kann nicht aufgehoben werden. Sie ergänzen einander, indem sie einander widersprechen; sie sind komplementäre Bilder des Geschehens.“[26]

Auf einem Physikkongress in Como (Italien) bezeichnete Bohr den Begriff der Komplementarität als geeignet, die besonderen Aspekte des Beobachtungsproblems innerhalb dieses Entscheidungsgebietes klarzulegen. Die beiden komplementären Eigenschaften der Quantenobjekte existieren stets nebeneinander, in der Beobachtung schließen sie sich allerdings gegenseitig aus. In Abhängigkeit vom jeweiligen experimentellen Kontext kommt einmal der Wellenaspekt und einmal der Teilchenaspekt des Lichts zum Tragen. Der Beobachtungsprozess selbst beeinflusst die Eigenschaften der zu beobachtenden Objekte. Werner Heisenberg (1901-1976) drückte es so aus: „Der Übergang vom Möglichen zum Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. (...), so müssen wir davon ausgehen, dass das Wort „geschieht“ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen. (...) Wir können sagen, dass der Übergang vom Möglichen zum Faktischen stattfindet, sobald die Wechselwirkung des Gegenstandes mit der Messeinrichtung und dadurch mit der übrigen Welt ins Spiel gekommen ist.“ [He59, S.37]

3.7. Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Für Quantenobjekte, wie zum Beispiel Photonen, kann eine Wahrscheinlichkeitsdichte P(x) angegeben werden, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quantenobjekt bei einer Messung an einem Ort x zu finden ist. In der Quantentheorie können über Einzelereignisse keine deterministischen Voraussagen getroffen werden. Lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen sind möglich. Mit der Wahrscheinlichkeitsdichte P(x) lassen sich Quantenobjekte mathematisch beschreiben. Ziel der Berechnungen ist die Ermittlung der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsfunktion für quantenphysikalische Fragestellungen. In der Praxis arbeitet man allerdings nicht mit P(x), sondern mit der Wellenfunktion Ψ(x). Es gilt:

$$P(x) = |\Psi(x)|^2 \quad (6)$$

Die Wellenfunktion Ψ(x) bezieht sich stets auf ein Ensemble von Quantenobjekten, d.h. eine Menge von identisch präparierten Quantenobjekten, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Mit Hilfe von Ψ(x) können die Probleme des Welle-Teilchen-Dualismus in der klassischen

[26] Carl Friedrich von Weizsäcker über Bohrs Komplementaritätsprinzip

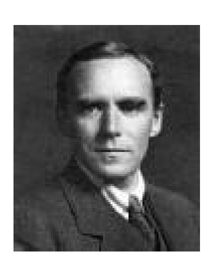
Physik quantentheoretisch überwunden werden. Ψ(x) entwickelt sich nach den Gesetzen der klassischen Wellentheorie. Die von Wasser-, Schall- und elektromagnetischen Wellen bekannten Phänomene wie Reflexion, Beugung und Interferenz sind auch bei Ψ(x) zu finden.

Diese Interpretation der Wahrscheinlichkeitsdichte wurde von *Max Born* (1882-1970)[27] begründet. Im Jahre 1954 erhielt Born für seine fundamentalen Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenphysik und insbesondere für diese Interpretation der Wellenfunktion den Nobelpreis für Physik. Die Kernaussage seiner Interpretation lautet: Die Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt im Volumenelement ΔV um den Ort x nachzuweisen:

$$P(x)\cdot\Delta V = \left|y\ (x)\right|^2 \cdot \Delta V \qquad (7)$$

Unter Hinzunahme des stochastischen Verhaltens von Quantenobjekten gelingt es in der Quantentheorie die Gegensätze von Wellen- und Teilchentheorie zu vereinen. Mit der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation werden die drei großen Standbeine der Quantentheorie, die klassische Mechanik als Teilchentheorie, die klassische Elektrodynamik als Wellentheorie und die stochastisch geprägte Thermodynamik, mit Hilfe der mathematischen Formelsprache unter einem Dach vereint und dadurch die Probleme des klassischen Welle-Teilchen-Dualismus überwunden.

3.8. Das Taylor-Experiment: Beugungsversuche mit verdünntem Licht



Die experimentelle Darstellung der Dualismus-Idee wurde auf verschiedene Arten versucht. Bereits 1908 untersuchte *Geoffrey I. Taylor* (1886-1975)[28] ein Beugungsexperiment mit Licht äußerst geringer Intensität. In seiner Theorie ist die Energie ungleichmäßig über die Wellenfront verteilt. Innerhalb der Wellenfront gibt es Regionen maximaler Energie, welche durch ungestörte Flächen von einander getrennt sind. Bei einer Verringerung der Intensität werde, so Taylor, nur der Abstand zwischen den Regionen größer, der Betrag der Energie in den Regionen ändert sich aber nicht, da sie in unteilbaren Einheiten auftritt. Er verringerte die Intensität des Lichts durch Rauchglasscheiben soweit, dass kaum mehr als zwei Quantenobjekte des Lichts zwischen Quelle und Schirm waren. Aufgrund dieser Reduzierung der Intensität erreichen nur

[27] Bildquelle: www.nobel.se/physics/laureates/1954/
[28] Bildquelle des Portraits: http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians

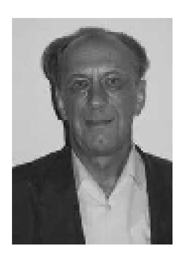
wenige Photonen sofort die „Huygens-Zone". Dadurch werden die bekannten Phänomene der Beugung eingeschränkt."[Ta09]

Großen Wert legte Taylor auf die quantitative Untersuchung der Lichtabschwächung. Dazu beleuchtete er den als Schirm verwendeten lichtempfindlichen Film mit unterschiedlich abgeschwächtem Licht. Die Belichtungszeit bis zur vollständigen Schwärzung des Films ist proportional zur Intensität des abgeschwächten Lichts. Taylor beleuchtete mit einer Gasflamme einen schmalen Spalt. Mit dem entstehenden Lichtstrahl, der noch durch die Rauchglasscheiben abgeschwächt wurde, beleuchtete er eine Nadelspitze. Ziel war die Beobachtung der Phänomene im Schattenwurf der Nadelspitze.

Bei kurzer Belichtungszeit zeigen sich stochastisch verteilte Schwärzungen auf dem Schirm. Jede Schirmstelle absorbiert einen ganz bestimmten Energiebetrag. Dieser experimentelle Befund lässt sich nicht mehr mit der Wellentheorie erklären. Die einzelnen Treffer auf dem Schirm offenbaren den Teilchencharakter der Lichtquanten. Zur Beschreibung der stochastischen Verteilung der Treffer ist die Wahrscheinlichkeitstheorie notwendig. Erst bei einer längeren Belichtungszeit und gleichzeitig weiterhin geringer Lichtintensität tritt das klassische Interferenzmuster auf, das seit Thomas Young mit Hilfe der Wellentheorie erläutert werden kann. Es entspricht dem Muster, das auch bei hoher Lichtintensität entsteht. Die Existenz von Interferenzerscheinungen ist also unabhängig von der Anzahl der Quantenobjekte.

Taylor wies damit erstmals Interferenzphänomene nach, die durch verdünntes Licht, sprich einzelne Photonen, erzeugt wurden. Gleichzeitig stellt sein Experiment erstmals die verschiedenen Charaktere des Lichts in einem Versuchsaufbau dar.

3.9. Claus Jönsson: Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen



In den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts untersuchten Boersch, Möllenstedt und Dücker die Elektronenbeugung am elektrischen Biprisma. Basierend auf diesen Experimenten entwickelte Möllenstedts Schüler *Claus Jönsson* [29] im Rahmen seiner Dissertation ein Doppelspaltexperiment, welches es erlaubt Elektroneninterferenzen zu visualisieren. Jönsson ersetzte das Biprisma durch

[29] Bildquelle des Portraits: Eberhard Karls Universität Tübingen

einen Doppelspalt und beobachtete auf einem Schirm auftreffende Elektronen. In Übereinstimmung mit der Teilchenvorstellung von Elektronen zeigen sich lokalisierbare Auftreffstellen der Elektronen auf dem Schirm. Die Positionen der einzelnen Auftreffstellen sind stochastisch verteilt. Nach ausreichend langer Experimentierzeit treten auf dem Schirm die seit Young bekannten Interferenzstreifen auf. Die Streifen sind nicht mehr mit der Teilchentheorie des Lichts erklärbar. Die Elektronen zeigen unter diesen experimentellen Bedingungen Wellencharakter. Jönsson gelang es, das entstandene Interferenzmuster auf Photopapier zu bannen (Abb.5).

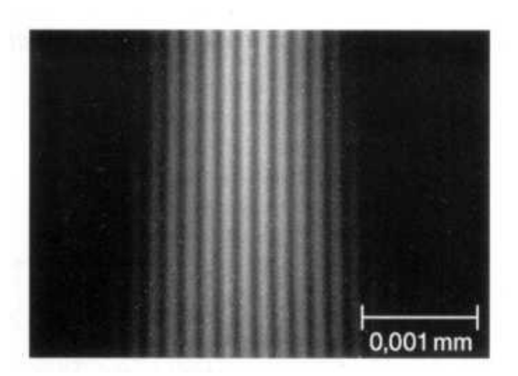


Abbildung 5: Elektroneninterferenz am Doppelspalt[30]

Mit den stochastisch verteilten einzelnen Treffern der Elektronen und dem daraus entstehenden Interferenzmuster zeigt sich die Natur der Quanten in ihrer Vielfalt in einem einzelnen Experiment.

Die Bedeutung des Experiments für die experimentelle Umsetzung der quantenphysikalischen Theorien zeigt sich auch im Ergebnis einer Umfrage von „Physics World", der Zeitschrift der englischen physikalischen Gesellschaft. Jönssons Doppelspalt Experiment wurde von der Mehrheit der Leserinnen und Leser als „The most beautiful experiment in physics" ausgewählt. „Galileis freier Fall" erreichte nur Platz 2. Das bereits erwähnte Urexperiment von Thomas Young wurde in dieser Umfrage auf Platz 5 gewählt.[31]

---

[30] Bildquelle: Eberhard Karls Universität Tübingen

[31] Physics World, September 2002; Quelle: http:// physicweb.org

II. Experimente zum Dualismus des Lichts

Die unterschiedlichen Facetten der Natur des Lichts können auf vielfältige Weise experimentell dargestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Experimente entwickelt und aufgebaut, die die Charaktere des Lichts experimentell veranschaulichen. Die Darstellung des Teilchencharakters wird durch das Hörbarmachen von Photonen realisiert. Der Wellencharakter zeigt sich bei der Beugung von Laserlicht an verschiedenen Spalten. In einem dritten Experiment, dem Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen, werden mehrere Charakterzüge des Lichts gleichzeitig deutlich.

1. Monochromatisches intensitätsschwaches kohärentes Licht

In den Experimenten wird das Verhalten von monochromatischem Licht untersucht. Die Kohärenz des Lichts ist Grundvoraussetzung für das Auftreten der Interferenzerscheinungen. Die Abschwächung der Intensität ermöglicht das Experimentieren mit einzelnen Photonen.

1.1. Die Lichtquelle – ein Laserdiodenmodul

Im verwendeten Lasermodul LAS 63/01-L[32] ist eine Laserdiode des „Can Type“ eingebaut (Abb. 6). Die gesamte Diode befindet auf einem Fuß (Stem) und wird von einem dosenförmigen Deckel (Cap) mit Öffnungsfenster (Window) umgeben. Der Anschluss der Laserdiode erfolgt über die drei Pins unterhalb des Stems.

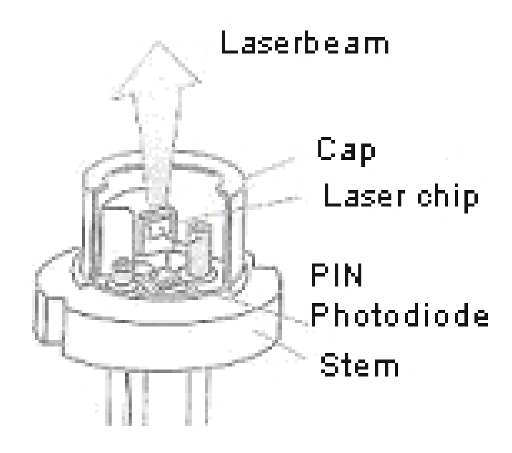


Abbildung 6: Schnittzeichnung durch eine Laserdiode[33]

---

[32] weitere Angaben: siehe Herstellernachweis im Anhang
[33] Bildquelle: [Sa02]

Der Laser-Chip ist aus verschiedenen Schichten aufgebaut. Das aktive Medium ist bei dem verwendeten Laserdiodenmodul eine p-n-Diode. Man bringt einen stark dotierten n-Halbleiter in engen Kontakt mit einem p-Halbleiter. Die entstehende p-n-Diode ist das Grundelement des Lasermoduls. Das Modul wird daher in die Gruppe der Halbleiterlaser eingeordnet. Bei Halbleiterlasern wird elektrischer Strom direkt in Laserlicht umgewandelt.

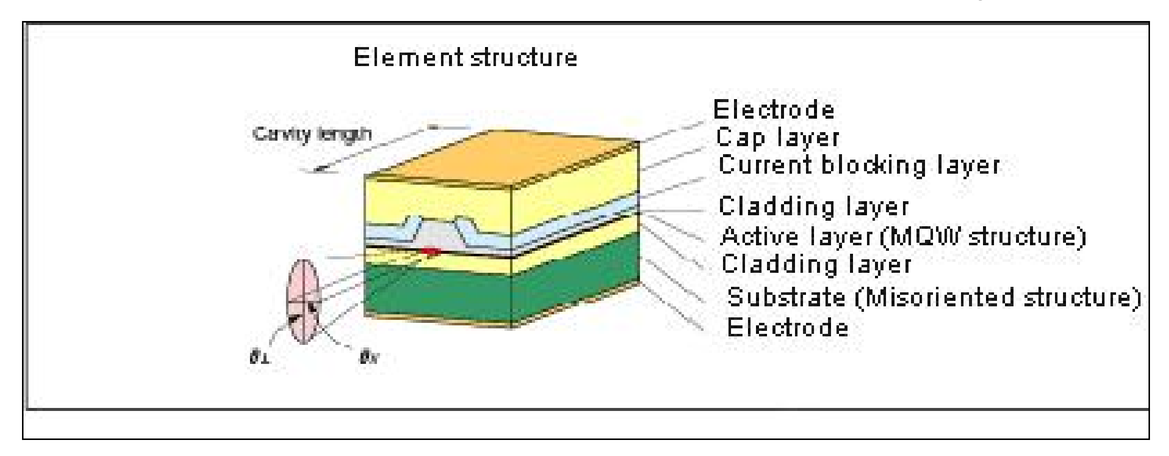


Abbildung 7: Struktur des Laserchips[34]

In der Mitte des Chips befindet sich die aktive Schicht (in Abb. 7 schwarz eingefärbt), die eine strained-MQW (Multiple quantum well) Struktur besitzt. Die MQW-Struktur besteht aus sehr dünnen Kristallschichten der Halbleitermaterialen. Die Gesamtdicke der aktiven Schicht beträgt einige Nanometer und ist damit in der Größenordnung der de Broglie-Wellenlänge der Elektronen.

Diese aktive Schicht ist von mehreren Schutzschichten ummantelt. Die Ober- und Unterseite des Laserchips bilden Elektroden, an die Spannung angelegt werden kann. Bei einer Spannung in Durchlassrichtung rekombinieren am p-n-Übergang Elektronen und Löcher. Dabei wird die freiwerdende Energie als Licht emittiert. Bei entsprechend hohen Strömen durch den p-n-Übergang, findet aufgrund induzierter Emission Lichtverstärkung statt [BS93, S.884]. Die Laseremission ist auf eine extrem schmale Zone um den p-n-Übergang beschränkt. Ohne angelegte Spannung hat das Ferminiveau einen konstanten Wert über den gesamten p-n-Übergang. Die Bänder der p- und n-Regionen sind gegeneinander verschoben. Wird eine Spannung in der Größenordnung der Energielücke in der Durchlassrichtung der Diode angelegt, so produziert man einen Fluss von Löchern von der p-Region in den p-n-Übergang. Dadurch entsteht eine schmale Zone, die sowohl Elektronen als auch Löcher enthält. Der

[34] Bildquelle: [Sa02]

Bereich mit einer Besetzungsinversion ist entstanden. Die elektromagnetische Strahlung wird beim Durchlaufen dieser aktiven Zone verstärkt. Das Laserlicht wird am oberen Ende des Laserchips emittiert und gelangt durch das Ausgangsfenster nach außen. Der Laserchip emittiert allerdings auch Licht am unteren Ende. Dieser Lichtstrom ist proportional zur Ausgangsleistung des Lasers. Dieses Licht trifft auf die PIN-Photodiode. Der erzeugte Photostrom dient der Kontrolle der Ausgangsleistung. Dadurch wird eine konstante Ausgangsleistung gewährleistet. Der verwendete Laser hat eine maximale Ausgangsleistung von P = 1 mW und gehört damit zur Laserklasse 2. Die Wellenlänge λ des emittierten Lichts beträgt 635 nm. Die Frequenz ν lässt sich mit Formel (8) errechnen:

$$n = \frac{c}{l} \qquad (8)$$

$$mit \quad l = 635\,nm \quad und \quad c = 2{,}998 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \qquad n = 4{,}724 \cdot 10^{14}\,Hz$$

Die Energie eines Photons beträgt nach Formel (5) damit:

$$E = h \cdot n = 3{,}130 \cdot 10^{-19}\,J$$

$$mit \quad h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\,Js$$

Für die Anzahl N der emittierten Photonen gilt folgende Gleichung:

$$N = \frac{P \cdot t}{E} \qquad (9)$$

Mit P=1mW und t = 100 ms ergibt sich für die Anzahl N:

$$N = \frac{P \cdot t}{E} = \frac{1mW \cdot 100ms}{3{,}130 \cdot 10^{-19}\,J} = 3{,}194 \cdot 10^{14}$$

Das heißt bei voller Laserleistung werden in 100 Millisekunden etwa $3{,}2 \cdot 10^{14}$ Photonen vom eingebauten Lasermodul emittiert.

Mit Hilfe des integrierten Treiberbausteins, der über ein 10 kΩ-Potentiometer gesteuert wird, kann die Leistung des Lasers im Bereich zwischen 0 und 1mW geregelt werden. Die Module benötigen 5 V Gleichspannung bei einer Stromaufnahme von 35 mA. Der Fokus der Module ist fest auf unendlich eingestellt, bei einem Strahldurchmesser von 2 mm am Modul.

Die Laserdiodenmodule werden bei allen drei Experimenten als Lichtquelle eingesetzt. Dadurch kann ausgeschlossenen werden, dass das Auftreten der unterschiedlichen Phänomene durch die Wahl der Lichtquelle beeinflusst wird.

1.2. Die verschiedenen Filter und ihre Funktionsweise

Um den Teilchencharakter des Lichts experimentell nachweisen zu können, muss die Anzahl der Photonen pro Zeiteinheit reduziert werden. Dadurch schafft man die Voraussetzung, dass einzelne Photonen isoliert nachgewiesen werden können. Deshalb wird der Laserstrahl durch diverse Filter[35] abgeschwächt und damit die Anzahl der am jeweiligen Detektor ankommenden Photonen reduziert.

Hauptsächlich werden neutrale Graufilter verwendet. Die Graufilter bestehen aus transparentem Glas, das einen Teil des Lichts ohne Streuung und Richtungsänderung durchlässt, während der andere Teil des Lichts absorbiert bzw. reflektiert wird. Der spektrale Transmissionsgrad hat folglich einen Wert kleiner 1. Da der Transmissionsgrad der verwendeten Filter wellenlängenunabhängig ist, wird diese Filterart als *Graufilter* bezeichnet; im Unterschied zu Farbfiltern, deren Transmissionsgrad wellenlängenabhängig ist. Dem Filterglas wurden während der Schmelze Substanzen beigemischt, die den Transmissionsgrad des Glases verändern. Die nicht durchgelassenen Lichtanteile werden größtenteils im Filterglas absorbiert, ein geringer Anteil wird an den Grenzflächen des Glases reflektiert. Man spricht in diesem Fall von *Massefiltern*.

Die verwendeten Graufilter haben über ihre gesamte Fläche einen konstanten Transmissonsgrad. Man spricht daher auch von Filter mit neutraler Dichte (engl.: Neutral Density). Der Wert dieser neutralen Dichte wird häufig anstelle des Transmissionsgrades in Datenblättern der Filter als technisches Maß für die Durchlässigkeit angegeben.

Neben den Massefiltern kommt ein *Interferenzfilter* zum Einsatz. Bei Interferenzfiltern wird der nicht durchgelassene Anteil des Lichts reflektiert. Im Vakuum werden auf eine Glasplatte dünne transparente Schichten mit hoher und niedriger Brechzahl aufgedampft. Das auftreffende Licht wird an den Schichten je nach Wellenlänge unterschiedlich reflektiert und überlagert sich anschließend. Aufgrund konstruktiver und destruktiver Interferenz addieren sich die Amplituden bestimmter Lichtanteile. Bei anderen Anteilen findet teilweise oder vollständige Kompensation statt. Mit Hilfe eines Interferenz-Bandpassfilters können bestimmte Wellenlängenbereiche selektiert werden. Der *Bandpassfilter* wird spektral charakterisiert durch ein definiertes Durchlassband, an das sich zu beiden Seiten Sperrbereiche anschließen. In-

[35] weitere technische Informationen zu den eingesetzten Filtern: siehe Herstellernachweis im Anhang

nerhalb des Durchlassbandes haben die Filter eine Durchlässigkeit von etwa 80 % und außerhalb dieses Bereiches sperren sie nahezu vollständig. Das Durchlassband wird charakterisiert durch die Angabe einer Center wavelength (CWL) in der Mitte des Durchlassbereiches. Die Halbwertsbreite (FWHM[36])ist die zweite charakteristische Größe der Bandpassfilter. Sie gibt die Breite der Transmissionskurve bei der Hälfte des halben Transmissionsmaximums an.

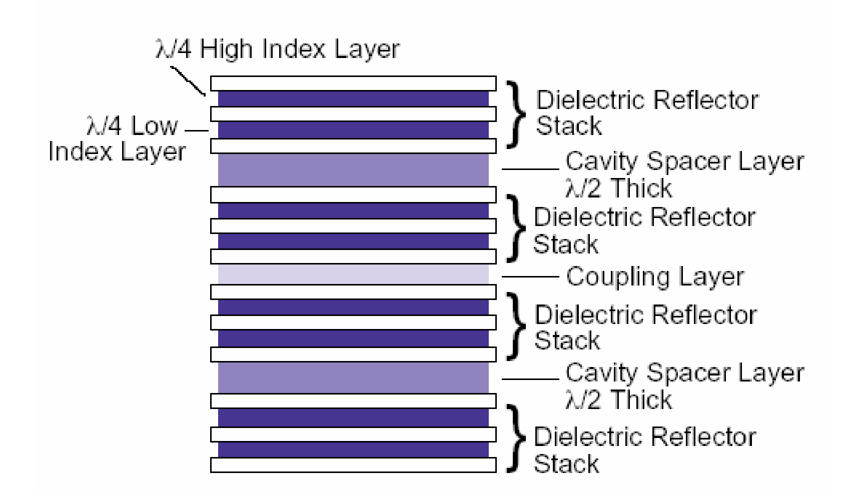


Abbildung 8: Der schematische Aufbau eines Interferenz-Bandpassfilters[37]

Der Bandpassfilter besteht aus verschiedenen Schichten Borosilikatglas. Diese Glasart erlaubt die Transmission von Licht der Wellenlängen 300 nm bis ins nahe Infrarot. Für UV-Licht ist Borosilikat-Glas nicht geeignet. Borosilikat-Glas wird im Wesentlichen aus Siliziumoxid (ca.80%) und Boroxid (ca.12%) gefertigt. Die einzelnen Schichten werden zu Kammern zusammengefasst. Der verwendete Filter besteht aus mehreren Kammern. Der schematische Aufbau dieser Kammern ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die einzelnen Kammern sind durch Abstandshalter (Coupling Layer) voneinander getrennt. Der Filter selektiert das transmittierte Spektrum durch konstruktive und destruktive Interferenz an den Grenzen der dielektrischen Schichten. Zwischen den dielektrischen Schichten befinden sich λ/4-Plättchen. In der Mitte einer Kammer befindet sich ein λ/2 breiter Abstandshalter. Zusätzliche absorbierende und reflektierende Schichten verhindern die Transmission unerwünschter Wellenlängen in einem weiten Bereich von UV bis IR. Durch die Kombination der verschiedenen Schichten und die Größe der Abstandshalter kann die Form des Transmissionsgraphen beeinflusst werden.

[36] engl.: Full width at half maximum, kurz FWHM
[37] entnommen aus [http://www.ealingcatalog.com/pdf/Filters.pdf]

Wird durch Hintereinandersetzen mehrerer Filter ein kombiniertes Filterelement erzeugt, so sind die Transmissionsgrade der einzelnen Filter miteinander zu multiplizieren, um den Gesamt-Transmissionsgrad zu ermitteln. Die Daten der eingebauten Filter sind in den Beschreibungen der jeweiligen Versuche zu finden.

Durch die eingebauten Filter wird die Intensität des Laserlichts so weit reduziert, dass das menschliche Auge nichts mehr wahrnehmen kann. Einzelne Photonen können nicht visualisiert werden. Der „Mangel" liegt aber nicht beim menschlichen Auge, sondern die „Gründe" liegen beim visuellen Nervensystem, welches für die Verarbeitung von optischen Reizen zuständig ist. Mediziner konnten nachweisen, dass die Stäbchen in der menschlichen Netzhaut auf einzelne Photonen reagieren. Die Verschaltung der Nerven zwischen Netzhaut und Gehirn erfordert es aber, dass innerhalb von 100 ms etwa 9 Photonen in einem gewissen Netzhautbereich registriert werden.[Mi03, Kap. 3.2] Aus diesem Grund muss man im Experiment auf technische Hilfsmittel zurückgreifen, um einzelne Photonen nachzuweisen.

2. Das Hörbarmachen von Photonen – Nachweis des Teilchencharakters

Abbildung 9: Versuchsaufbau: "Hörbarmachen von Photonen"[38]

Der vorgestellte Versuch (Abb.9) ermöglicht es den Teilchencharakter des Lichts durch Audio-Signale zu demonstrieren. Das Licht einer Laserdiode trifft, abgeschwächt durch mehrere Filter auf einen Photomultiplier (PM). Für jeden Photonentreffer erzeugen der Photomultiplier und die angeschlossene Elektronik ein Audio-Signal. Der Laserstrahl kann zusätzlich mechanisch durch einen Shutter unterbrochen werden, was das Ausbleiben der Audio-Signale zur Folge hat. Der gesamte Weg des Lichts vom Laser zum Photomultiplier ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

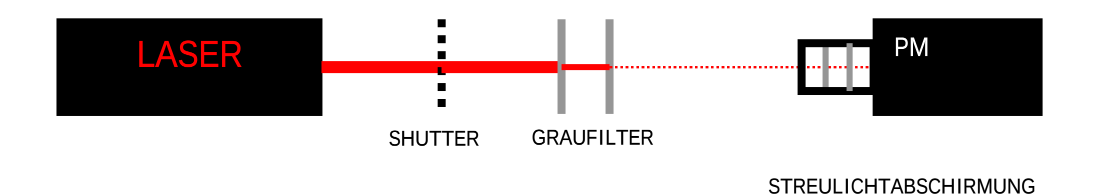


Abbildung 10: Schemazeichnung des Versuchsaufbaus

[38] Bildquelle: eigenes Foto

2.1. Abschwächung des Laserstrahls

Um den Teilchencharakter des Lichts durch Audio-Signale nachweisen zu können, muß die Intensität des Laserstrahls reduziert werden. Dazu wird der Laserstrahl durch mehrere Filter abgeschwächt. Auf der optischen Bank sind zwei Graufilter mit einem Transmissionsgrad von 1% sowie 5% eingebaut. Es ergibt sich ein Gesamttransmissionsgrad von 0,05 %. Diese beiden Filter dienen ausschließlich dazu, die Intensität des Laserstrahls abzuschwächen. Es erreichen also insgesamt $1{,}6 \cdot 10^{11}$ Photonen pro 100 ms die Photomultiplier-Box.

Der so durch die Filter abgeschwächte Laserstrahl trifft auf das Eingangsfenster der Photomultiplier-Box. In dieser Box befinden sich zwei Filter sowie das Photosensormodul. Unmittelbar hinter dem Eingangsfenster der Box ist ein weiterer Graufilter (Transmissionsgrad 1%) eingebaut, welcher identisch mit dem auf der optischen Bank verwendeten ist. Hinter diesem Graufilter befindet sich ein Interferenz-Bandpassfilter, dessen CWL laut Datenblatt 632,8 nm und laut mitgeliefertem Prüfprotokoll 633,5 nm beträgt. Die Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 23°C. Die Wellenlängen-Verschiebung bei Temperaturschwankungen beträgt 0,025 nm/ °C. Dies ist für unsere Einsatzbedingungen vernachlässigbar. Die FWHM beträgt 11 nm, das heißt, das verwendete Laserlicht befindet sich mit seiner Wellenlänge von 635 nm innerhalb der FWHM.

Der Bandpassfilter dient gemeinsam mit dem Graufilter hauptsächlich der Streulichtabschirmung. Das Umgebungslicht wird zuerst durch den Graufilter um den Faktor 0,01 abgeschwächt. Der Bandpassfilter lässt nur Lichtanteile mit einer Wellenlänge in der Nähe der CWL passieren, so dass lediglich Licht aus dem orange-roten Bereich des Spektrums den Photomultiplier erreicht. Der Laserstrahl wird wie das Streulicht am Graufilter ebenfalls abgeschwächt, passiert aber anschließend den Bandpassfilter bei einer Transmissonsrate von 80% weitgehend ungestört, da die Wellenlänge des Laserlichts mit 635 nm sehr nahe der CWL mit 632,5 nm ist. Der Laserstrahl wird also bis zum Erreichen des Photomultipliers insgesamt um den Faktor 1 zu 250.000 abgeschwächt. Es erreichen im Mittel $1{,}3 \cdot 10^{9}$ Photonen pro 100 ms den Photomultiplier.

2.2. Nachweis der Photonen - das Photosensormodul

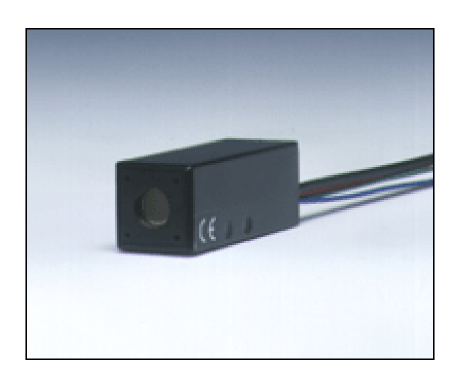


Abbildung 11: Das Photomultipliermodul H 5784 (links) und die darin eingebaute Photomultiplierröhre R7400 U (rechts) [39]

Das Photosensormodul besteht aus einer metallummantelten Photomultiplier-Röhre, einer Hochspannungsversorgung und einem rauscharmen Verstärker. Das verwendete Hamamatsu-Modul H 5784 (Abb.11, links) ist für Anwendungen im gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums geeignet. Die spektrale Empfindlichkeit reicht von 300 nm bis 650 nm. Die Grenzen der Empfindlichkeit ergeben sich aufgrund der Materialeigenschaften des Fensters (bei kurzen Wellenlängen) und der Photokathode (bei langen Wellenlängen). Die Photonen, welche die Streulichtfilter passiert haben, treffen auf die Photomultiplier-Röhre. Im Hamamatsu-Modul H 5784 ist die Miniatur Photomultiplier-Röhre R7400U eingebaut (Abb.11, rechts). Die Abmessungen der eigentlichen Röhre betragen 10,3 x 15,5 mm.

Die metallummantelte Röhre ist evakuiert und mit einer Isolationshülle versehen. Da die Metallhülle mit der Kathode verbunden ist, liegt negative Hochspannung an dem Metallmantel an. Die Isolationshülle schützt die anderen Bauteile des Moduls vor elektrischen Überschlägen. An der Vorderseite des Moduls sind die Metall- und die Isolationshülle geöffnet. Dort befindet sich ein Einlassfenster aus Borosilikat-Glas. Die einfallenden Photonen passieren das „Light incoming window“, welches einen Durchmesser von 10 mm hat. Unmittelbar hinter dem Einlassfenster befindet sich die Bialkali-Photokatode. Sie hat eine effektive Fläche von 8 mm Durchmesser. Die Wellenlänge mit der größten Empfindlichkeit liegt für diese Bialkali-Photokathode bei 420 nm. Der genaue Verlauf der photoelektrischen Empfindlichkeit ist in Abbildung 12 mit einer logarithmischen Skala gegen die Wellenlänge des detektierten Lichts aufgetragen. Der Graph „R7400U“ zeigt den Verlauf für die verwendete Röhre.

[39] Bildquelle: [www.hamamatsu.com]

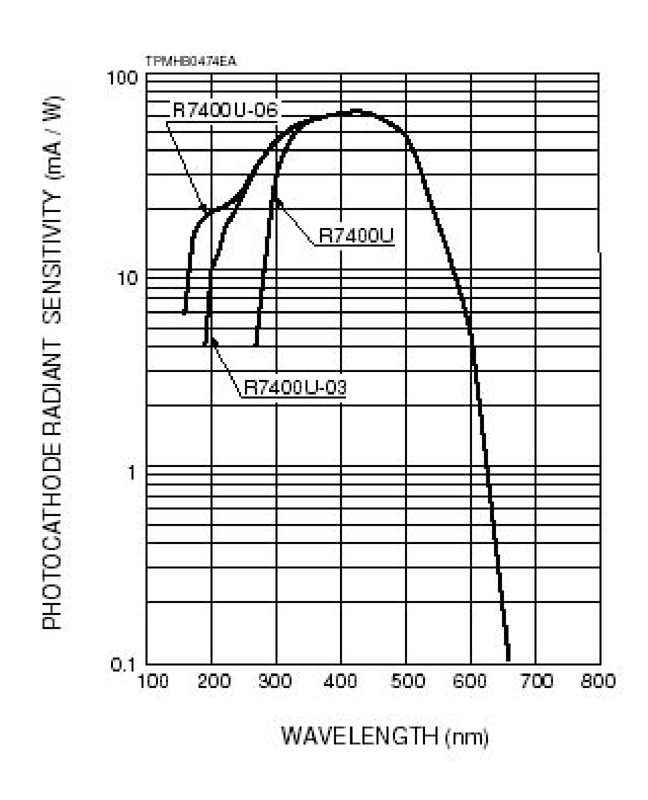


Abbildung 12: Photoelektrische Empfindlichkeit (Bialkali-Kathode)[40]

Die spektrale Empfindlichkeit für die verwendete Laserwellenlänge befindet sich zwischen 0,1 und 0,5 mA/W. Die entspricht einer Quantenausbeute von ca. 0,5%-1%. Das heißt nur etwa jedes hundertste Photon, das das Eintrittsfenster des Photomultipliers erreicht, verursacht die Erzeugung von Elektronen. Dies sind bei voller Laserleistung etwa $1{,}3 \cdot 10^9$ pro 100 ms. Aufgrund des Photoeffekts werden durch diese Photonen im Inneren der Kathode Elektronen freigesetzt. Da diese Elektronen infolge von Stößen mit dem Metallgitter ihre Energie teilweise verlieren, kann nur ein Teil der freigesetzten Elektronen die Kathodenoberfläche verlassen. Das Verhältnis zwischen den eingestrahlten Photonen und ausgelösten Elektronen wird als Quantenausbeute bezeichnet.

Die ausgelösten Elektronen werden aufgrund des angelegten elektrischen Feldes im Vakuum in Richtung des Elektronenmultipliers beschleunigt (Abb.13) Sie treffen auf die erste Dynode des Elektronenverstärkers. Der Elektronenverstärker besteht aus einer mehrstufigen Anordnung von Elektroden, den so genannten Dynoden. Die Dynoden bestehen aus einem Material mit hohem Sekundäremissionskoeffizienten. Der Multiplier wird deshalb auch als Sekundärelektronenvervielfacher bezeichnet.

---

[40] entnommen aus [Ha98, S.2]

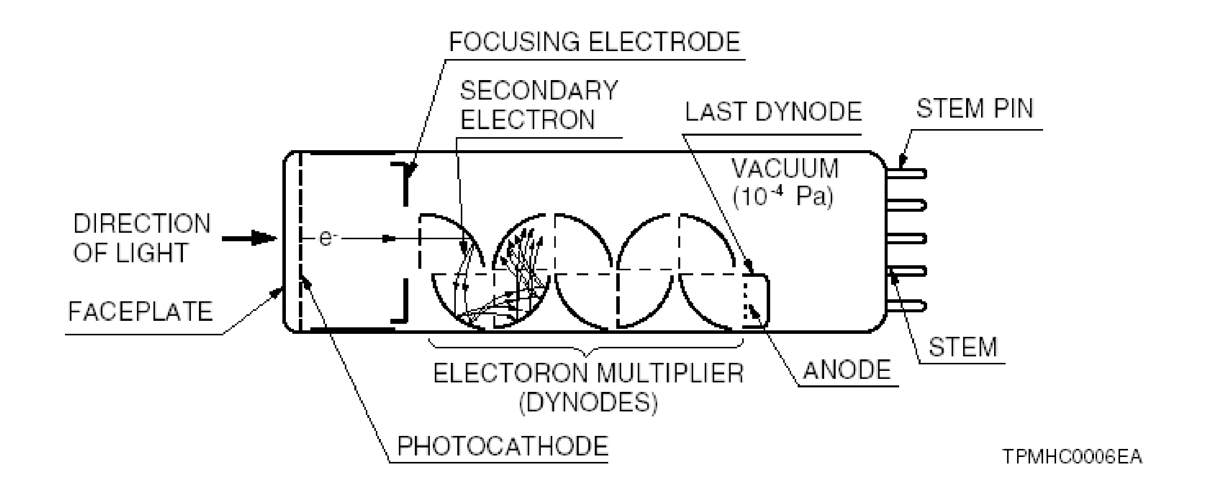


Abbildung 13: Schnittzeichnumg durch eine Photomultiplierröhre[41]

Pro einfallendem Elektron werden von der Dynode mehrere Sekundärelektronen emittiert. Die Sekundärelektronen werden auf die nächste Dynode beschleunigt und lösen dort ihrerseits einen Schauer von neuen Sekundärelektronen aus. Dieser Vorgang wiederholt sich an den darauf folgenden Dynoden [Kl92, S.146]. Bei einer Spannung von etwa 800 V wird für die eingebaute Bialkali-Kathode eine Verstärkung von cirka $7*10^5$ erreicht. Die Abhängigkeit der Verstärkung von der Spannung ist in Abbildung 14 logarithmisch aufgetragen. Der Graph zeigt den Verlauf für die verwendete Röhre.

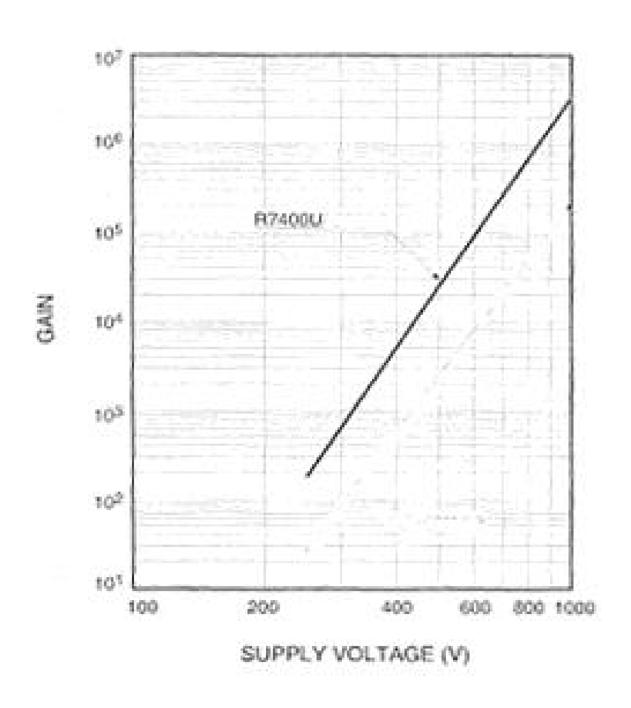


Abbildung 14: Typische Verstärkercharakteristik[42]

---

[41] Bildquelle: www.hamamatsu.de
[42] entnommen aus [Ha98, S.4]

Die Sekundärelektronen treffen am Ende der Dynodenreihe auf die Anode. Der Strom wird über einen Widerstand als Output-Signal der Photomultiplier-Röhre an den Verstärker weitergegeben. Die Form des Anodensignals soll das Signal des einfallenden Lichts möglichst unverfälscht wiedergeben. Zur Verbesserung der Signalqualität ist der Verstärker nahe des Anoden-Output-Pins der Photomultiplierröhre angeordnet. Da es sich bei der Messung von Licht um ein Hochgeschwindigkeitsereignis handelt, ist das zeitliche Verhalten des Photomultipliers von entscheidender Bedeutung für die Signalqualität. Bei der eingebauten Röhre sind die Abstände zwischen Photokathode, Dynoden und Anode bestmöglich minimiert. Gemeinsam mit dem hohen elektrischen Feld wird dadurch eine sehr kurze Laufzeit der Elektronen in der Röhre erreicht. Die Laufzeit beeinflusst entscheidend die Qualität des Signals. Aufgrund der kurzen Laufzeiten wird eine Flankenanstiegszeit von etwa 780 ps und eine Abfallzeit von etwa 1150 ps erreicht. Die typische Form des Outputsignals des R7400U ist in Abbildung 15 illustriert.

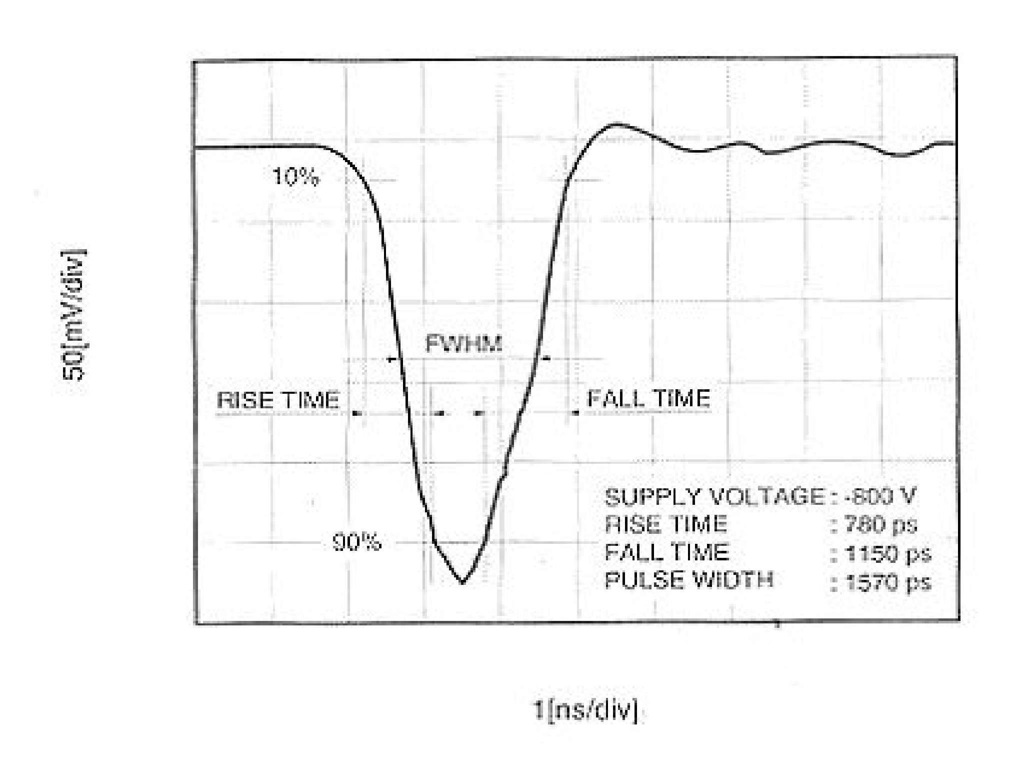


Abbildung 15: Typische Form des Ausgangssignals[43]

Die Einstellung der Sensitivität des Photomultipliers erfolgt über die Variation der Versorgungsspannung des Photomultipliers. Die Spannungsversorgung kann mit Hilfe eines Poten-

---

[43] entnommen aus [Ha98, S.5]

tiometers variiert werden. Hierzu wird eine vom Photomultiplier-Modul gelieferte Referenzspannung (V_{ref}) variiert durch das Potentiometer als Kontrollspannung ($V_{control}$) an das Photomultipliermodul zurückgeführt. Der Wert der Kontrollspannung kann mit Hilfe eines Multimeters kontrolliert werden. Die Sensitivität des Photomultipliermoduls kann somit den jeweiligen Lichtverhältnissen angepasst werden.

2.3. Vom detektierten Photon zum hörbaren Signal
Die Triggerelektronik und die Aktivboxen

Das Spannungssignal der Anode trifft in der angeschlossenen Elektronik[44] auf eine Schmitt-Trigger-Schaltung. Diese Schaltung besteht aus einem als Komparator mit Hysterese verschalteten Operationsverstärker (LM358N) sowie zwei Widerständen, die den Schwellenwert der Hysteresekurve definieren. Das Eingangssignal wird mit der Betriebsspannung verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleiches kann an der Ausgangsspannung abgelesen werden. Überschreitet das Signal der Anode den eingestellten Schwellenwert, schaltet sich das Ausgangssignal der Trigger-Schaltung um. Wird der Schwellwert nicht überschritten, bleibt das Ausgangssignal bei seinem aktuellen Wert. Die Schaltung selektiert so zwischen geeigneten Ereignissen im Photomultiplier und nicht verwertbarem Untergrund. In einer zweiten Komparator-Schaltung (OP[45] LM311N) wird das Output-Signal der ersten Komparatorschaltung mit einer variablen Vergleichsspannung verglichen. Hierdurch findet eine zweite Selektion zwischen brauchbaren und unbrauchbaren Ereignissen statt, wobei die Grenze zwischen brauchbaren und unbrauchbaren Ereignissen mittels der Vergleichsspannung frei einstellbar ist. In einer dritten Komparatorschaltung (Monoflop 74121N) wird für jedes brauchbare Ereignis ein einzelner Spannungsimpuls ausgelöst. Mit Hilfe einer Potentiometer-Kondensator-Schaltung kann die Länge der Spannungspulse, die an die Aktivlautsprecher geliefert werden, eingestellt werden.

Diese Spannungsimpulse werden vom Verstärker der angeschlossenen Aktiv-Boxen verstärkt und anschließend als einzelne Audio-Signale („Knacks“) am Lautsprecher ausgegeben.

---

[44] Schaltplan: siehe Abb.57 (Elektronik-Layout) im Anhang

[45] OP: Operationsverstärker

Für jedes im Photomultiplier detektierte Photon wird also mit der Elektronik und den Aktiv-Boxen ein hörbarer „Knack“ erzeugt. Die Folge dieser Signale ist statistisch unregelmäßig (Poisson-Verteilung), vergleichbar mit der Folge radioaktiver Zerfälle. Die mittlere Anzahl der Knacke pro Zeiteinheit lässt sich voraussagen, umso genauer, je länger der Zeitraum ist. Der Einzelakt entzieht sich jedoch jeder Voraussage.

Wird der Laserstrahl mittels der eingebauten Blende unterbrochen, hört auch das Knacken auf. Das Laserlicht ist also einwandfrei der Auslöser der akustischen Ereignisse.

Zusätzlich zur Photomultipliersteuerung und der Triggerelektronik ist die komplette Spannungsversorgung der IC´s (+5 V) und des Photomultipliers (+11,5V bis +15,5V / -11,5V bis -15,5 V) auf der Platine untergebracht. Die Netzspannung (230V) wird mit dem eingebauten Netzteil auf +12 V/GND/-12V transformiert.

Der genaue Schaltplan sowie der Bestückungsplan der Platine sind im Anhang dieser Arbeit abgedruckt.

3. Variationen des klassischen Doppelspaltexperiments – der Wellencharakter des Lichts

Der Nobelpreisträger Richard Feynman sagte zur Bedeutung des Doppelspaltexperiments: „Das zentrale Geheimnis der Quantenphysik steckt im Doppelspaltexperiment“.[46]Das heißt anhand des Doppelspaltexperiments kann eine Vielzahl der zentralen quantenphysikalischen Fragestellungen experimentell behandelt werden. Insbesondere lässt sich an den verschiedenen Varianten des Doppelspaltexperiments die Quantennatur des Lichts erarbeiten. Es zeigt sich das „*Wellige*“, „*Körnige*“ und „*Stochastische*“ der Quantenphysik[Le00a, S.6].

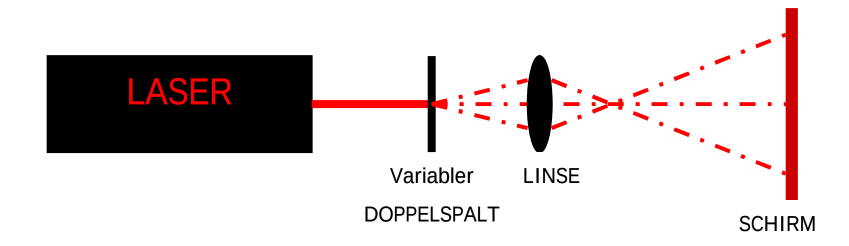


Abbildung 16: Schemazeichnung des Doppelspaltversuchs

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau (Abb.16) entwickelt, der mehrere Möglichkeiten zur Variation des Doppelspaltexperiments bietet. Der Versuchsaufbau basiert auf der Grundidee des Youngschen Doppelspaltexperiments[47]. Das historische Experiment des Engländers verhalf der Wellentheorie zum Durchbruch. Der Wellencharakter des Lichts wird im Interferenzmuster auf dem Schirm deutlich (Abb.17).

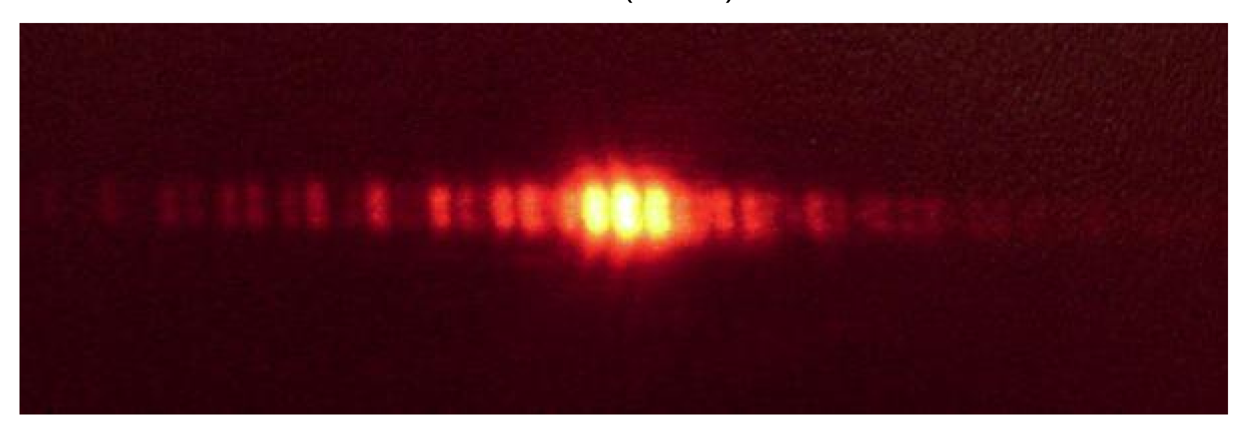


Abbildung 17: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch[48]

---

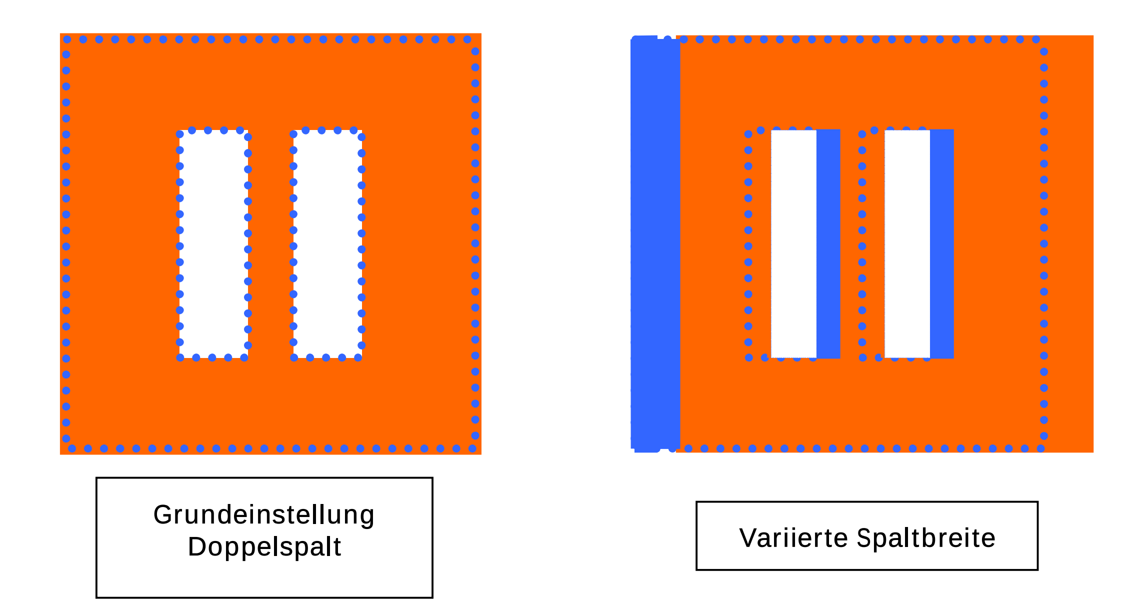
[46] Richard Feynman, entnommen aus [Le00a, S.5]
[47] vgl. Kapitel I.2.4.
[48] Bildquelle: eigenes Foto

Abbildung 18: Das Doppelspaltexperiments[49]

Lichtquelle ist bei diesem Versuch wiederum das Lasermodul[50] (in Abb. 18 rechts). An der Position des Doppelspalts befindet sich ein für diesen Versuch entwickeltes Bauteil, das die Variationsmöglichkeiten in der Versuchsdurchführung ermöglicht. Das Bauteil besteht aus zwei Metallplatten, die beide mit identischen Doppelspalten versehen wurden. Die Spalte haben einen Abstand von 0,25 mm und jeweils eine Breite von 0,2 mm. Die Metallplatten mit den Doppelspalten befinden sich im Abstand von 2 mm im Strahlengang. Der vom Laser aus gesehene zweite Doppelspalt ist fest eingebaut, der erste Doppelspalt kann dagegen mit Hilfe einer Mikrometerschraube horizontal verschoben werden. Dadurch können verschiedene Spaltbreiten und Spaltabstände eingestellt werden (Abb.19). In der Grundeinstellung der Doppelspalte sind die Öffnungen deckungsgleich. Das Ensemble kann wie ein einzelner Doppelspalt mit einer Spaltbreite von 0,2 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm behandelt werden. Durch die horizontale Verschiebung des vorderen Doppelspalts wird die Spaltbreite sukzessive verkleinert und gleichzeitig der Spaltabstand um dasselbe Maß vergrößert. Bei einer Verringerung der Spaltbreite um 0,05 mm vergrößert sich der Spaltabstand entsprechend auf 0,3 mm, bei einer Spaltbreite von 0,1 mm beträgt der Spaltabstand 0,35 mm usw. Das Beugungsmuster auf dem Schirm verändert sich entsprechend. Bei der Verschiebung des vorderen Doppelspalts um genau 0,2 mm sind die Spalte vollständig durch das hintere Blech verdeckt und das Interferenzmuster verschwindet.

---

[49] Bildquelle: eigenes Foto
[50] siehe Kap. II.1.



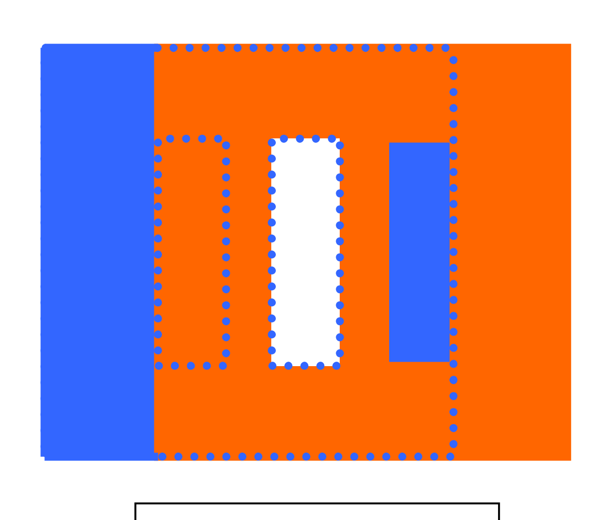


Abbildung 19: Funktionsprinzip des variablen Doppelspalts

Erst ab einer Verschiebung größer als 0,25 mm ergibt sich wieder eine Anordnung bei der die Öffnungen des vorderen und hinteren Doppelspalts aufeinander liegen. Nun ist allerdings jeweils nur noch ein Spalt geöffnet, sodass man auf dem Schirm das Beugungsmuster eines Einzelspalts sieht. Wenn der variable Doppelspalt um 0,45 mm verschoben wird, ist sein linker Spalt deckungsgleich mit dem rechten Spalt des zweiten Doppelspalts, bzw. komplementär dazu sein rechter Spalt deckungsgleich mit dem linken des zweiten Doppelspalts. Das Beugungsmuster des Einzelspalts zeigt sich deutlich auf dem Schirm (Abb.20).

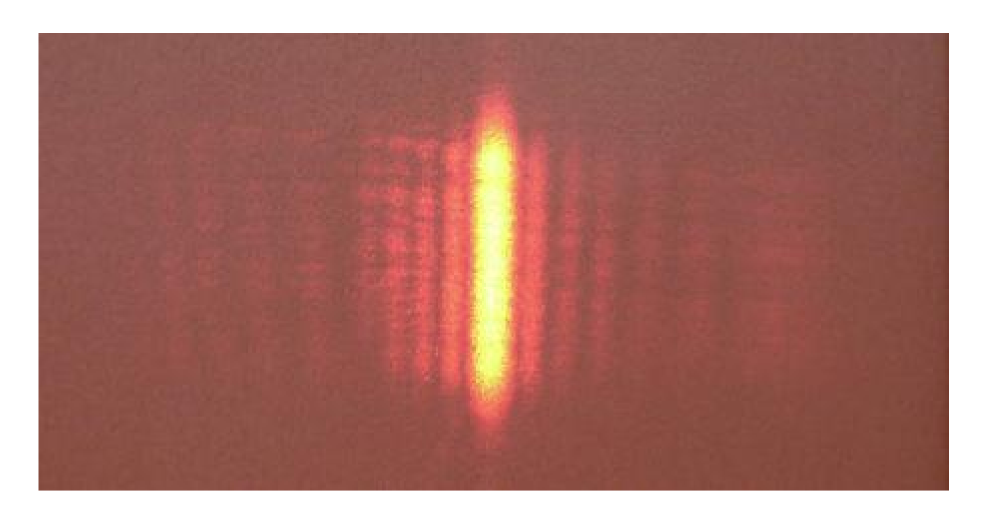


Abbildung 20: Interferenzmuster bei Einzelspalt-Einstellung und eingebauter Linse[51]

Auf der optischen Achse kann hinter den Doppelspalten eine Linse mit einer Brennweite von 50 mm eingebaut werden. Da der Schirm auf der optischen Achse weit hinter der Brennweite der Linse positioniert ist, wird das Beugungsbild bei eingebauter Linse aufgeweitet und auf dem Schirm abgebildet. In horizontaler Richtung vergrößert sich die Breite der einzelnen Maxima und Minima, d.h. die hellen Streifen erscheinen größer und deutlicher von einander getrennt. In vertikaler Richtung werden die Streifen länger. Das Beugungsbild erscheint im Übrigen gemäß den Gesetzen der geometrischen Optik spiegelverkehrt und auf dem Kopf stehend. Dies ist allerdings aufgrund der symmetrischen Form des Musters unerheblich. Insgesamt wird das Interferenzmuster bei Einsatz der Linse deutlicher als Streifenmuster erkennbar (Abb.21)

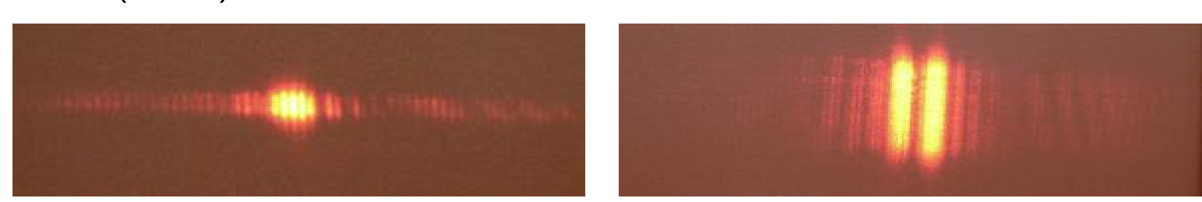


Abbildung 21: Interferenzmuster bei gleicher Doppelspalt-Einstellung;
links ohne eingebaute Linse und rechts mit eingebauter Linse[52]

Das Muster besteht aus einem Wechsel zwischen hellen und dunklen Streifen, den Interferenzmaxima und Interferenzminima. Beim Doppelspalt sind sie Resultat zweier sich überlagernder Ereignisse. Zum einen die Beugung der Wellen an den einzelnen Spalten, zum anderen die Interferenz am Doppelspalt. Die Intensitätsverteilung der Beugung am Spalt bildet die einhüllende Kurve der Interferenzverteilung am Doppelspalt.

[51] Bildquelle: eigene Bild
[52] Bildquelle: eigene Bilder

Die Interferenzmaxima werden nach außen hin lichtschwächer. Um mehr Maxima auf dem Schirm sichtbar zu machen, wird ein roter Schirm eingesetzt. Durch den farbigen Schirm ist der Farbunterschied zwischen Interferenzphänomen und Hintergrund gering. Es wird hierbei die Physiologie des Auges ausgenutzt. Ein physikalischer Reiz des Auges wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Umgebung unterschiedlich wahrgenommen, um stets zu gewährleisten, dass ein ausreichender Unterschied zur Umgebung erkannt wird. Im Empfindungsmechanismus des Auges gibt es eine Art Kontraststeigerung, die dem Gehirn hilft, sehr geringe Farbunterschiede empfindungsmäßig zu vergrößern, das heißt deutlicher zu machen. Dieses Phänomen wird in der Physiologie als *Simultankontrast* des Auges bezeichnet. Treffen gleichzeitig verschiedene Helligkeits- und Farbreize an benachbarten Netzhautstellen ein, können Randunschärfen auftreten. Diese werden durch eine verstärkte Dunkel- bzw. Gegenfarbempfindung in der Nachbarschaft der betroffenen Netzhautstellen ausgeglichen [Ro99]. Mit diesem Trick können im Vergleich zum weißen Schirm etwa 1-2 Maxima auf jeder Seite zusätzlich sichtbar gemacht werden.

Eine weitere Variationsmöglichkeit ermöglichen die eingebauten Polarisationsfilter. Im unteren Teil des vorderen Doppelspalts sind vor den Spaltöffnungen Polarisationsfilter angebracht. Da die Polarisationsrichtungen der beiden Filter, um 90° gegeneinander verdreht sind, stehen die Schwingungsebenen der sich überlagernden Lichtstrahlen senkrecht zueinander. Seit Fresnel (vgl. Kapitel I.2.5.) ist bekannt, dass derart präpariertes Licht keinerlei Interferenzerscheinungen zeigt. Auch im hier vorgestellten Versuch verschwindet das Interferenzmuster, wenn der Laserstrahl vor dem Doppelspalt die Polarisationsfilter passiert (Abb. 22).

Abbildung 22: Schirmbild bei Einsatz der Polarisationsfilter vor dem Doppelspalt[53]

---

[53] Bildquelle: eigenes Foto

Experimentell wird damit Bohrs Komplementaritätsprinzip untermauert. (vgl. Kapitel I.3.6.) Solange kein Versuch unternommen wird, die Lichtquanten entlang ihres Weges durch die Versuchsapparatur zu lokalisieren, zeigt sich der Wellencharakter des Lichts. Aufgrund der Polarisationsfilter werden die beiden möglichen Wege durch den Doppelspalt unterscheidbar. Die Photonen sind als Teilchen „gekennzeichnet“. In der Beobachtung treten sie dann auch nur noch als solche auf; das Interferenzmuster – Kennzeichen des Wellencharakters – verschwindet.

Die Markierung des Weges kann allerdings durch einen weiteren, im 45° Winkel zu den anderen Filtern stehenden, Polarisationsfilter aufgehoben werden. Das Interferenzmuster wird, wenn auch undeutlicher als zuvor, wieder sichtbar, da dem einzelnen Photon kein eindeutiger Weg durch den Doppelspalt mehr zugewiesen werden kann. Es zeigt sich wieder der Wellencharakter des Lichts(Abb.23).

Abbildung 23: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch[54]

[54] Bildquelle: eigenes Foto

4. Einzelne Photonen am Doppelspalt – der Versuchsaufbau

Nachdem Claus Jönsson das Doppelspaltexperiment für Elektronen aufgebaut hatte, stellt sich die Frage, ob das klassische Doppelspaltexperiment auch mit einzelnen Photonen realisiert werden kann. Hierzu wurde im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit ein Versuchsaufbau erstellt, der mit Hilfe moderner Technik das gewünschte Ergebnis liefert (Abb. 24).

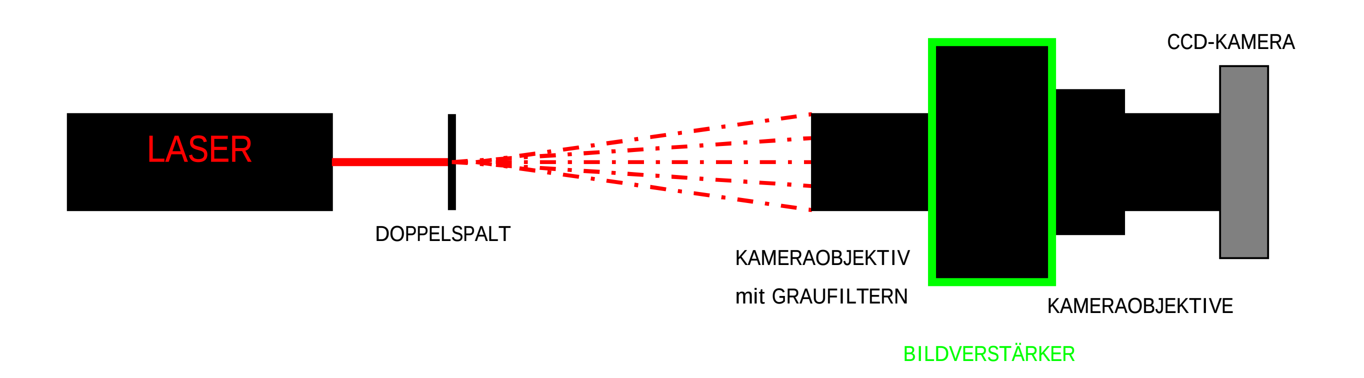


Abbildung 24: Schematischer Aufbau des Doppelspaltversuchs mit einzelnen Photonen[55]

4.1. Die Präparierung des Lichts: Laser, Doppelspalt, Filter, Objektiv

Die Lichtquelle ist das schon aus den ersten beiden Versuchen bekannte Lasermodul. Der Laserstrahl trifft auf einen Doppelspalt mit 0,08 mm Spaltbreite und 0,5 mm Spaltabstand und wird dort gebeugt. Der Laserstrahl hat einen Durchmesser von 2mm und bestrahlt damit eine Fläche von etwa 12,56 mm². Der Flächeninhalt der Spaltöffnungen beträgt nur beide Spalte zusammengenommen 0,32 mm². Das heißt nur etwa 2,5 % der Photonen passieren den Doppelspalt. Bei voller Laserleistung sind dies in 100 ms etwa $8 \cdot 10^{12}$ Photonen.

Der Abstand zwischen Doppelspalt und Bildverstärkervorderseite beträgt 650 mm. Vor dem Bildverstärker ist ein Kameraobjektiv aufgeschraubt, das ein scharfes Abbild auf der Vorderseite des Bildverstärkers ermöglicht. An der Vorderseite dieses Objektivs sind mit Hilfe von Adaptern direkt mehrere Graufilter aufgeschraubt. Die Filter können dadurch zwei Aufgaben gleichzeitig wahrnehmen. Zum einen schützen sie den Bildverstärker vor zu intensivem Streulichteinfall. Der Bildverstärker ist von seiner Sensitivität her zur Verarbeitung sehr licht-

---

[55] CCD: charged coupled device (weitere Erläuterungen siehe Kapitel 4.4.)

schwacher Signale gebaut und muss daher durch Filter vor zu starkem Licht geschützt werden. Dies geschieht am effektivsten, wenn die Filter direkt auf das Objektiv aufgeschraubt sind. Die zweite Aufgabe der Filter besteht wiederum in der Minderung der Intensität des Laserlichts. Da der Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen realisiert werden soll, muss der Laserstrahl durch Graufilter abgeschwächt werden.

Eingebaut sind ein 2fach, 4fach und 8fach Graufilter mit einer Durchlässigkeit von 50%, 25% und 12,5 %. Diese Filter haben eine Gesamtdurchlässigkeit von 1,5625 %. Die Ausgangsleistung des Lasers wird auf diesen Prozentsatz abgeschwächt. Von den etwa $8 \cdot 10^{12}$ Photonen, die bei voller Leistung vom Laser in 100 ms emittiert werden und anschließend den Doppelspalt passieren, erreichen etwa $1{,}25 \cdot 10^{11}$ Photonen den Bereich hinter diesen Filtern. Zusätzlich zu diesen Filtern kann entweder ein ND 4.0 oder ein ND 6.0 Filter[56] eingebaut werden. Der ND 4.0 Filter hat eine Durchlässigkeit von 0,01%, der ND 6.0 Filter hat eine Durchlässigkeit von 0,0001%. In der Regel ist der ND 4.0 Filter eingebaut, was zu einer Gesamtabschwächung von $1{,}5625 \cdot 10^{6}$ führt. Insgesamt erreichen damit in 100 ms etwa $1{,}25 \cdot 10^{7}$ Photonen den Bildverstärker. Alternativ kann auch der ND 6.0 Filter aufgeschraubt werden. Dann erreichen etwa $1{,}25 \cdot 10^{5}$ Photonen pro 100 ms den Bildverstärker. Werden beide Filter zusammen aufgeschraubt, erreichen etwa 10 Photonen pro 100 ms den Bildverstärker.

4.2. Der Bildverstärker

Anstelle des Schirmes beim klassischen Doppelspaltexperiment ist hier ein Kamerasystem eingebaut. Die ankommenden Photonen treffen auf einen Bildverstärker der Firma Proxitronic, welcher ein für die verwendete CCD-Kamera verwertbares Bild erzeugt. Das grundsätzliche Bauprinzip des Bildverstärkers ist in Abbildung 25 illustriert. Die Rolle des menschlichen Auges übernimmt in diesem Experiment ein CCD-Chip, der, bezogen auf diese Anwendung, dem menschlichen Auge weit überlegen ist. Das Objektiv mit 16 mm Brennweite bildet ein scharfes Abbild des entstehenden Interferenzmusters auf das Eingangsfenster des Bildverstärkers ab. Das Grundprinzip (Abb.25) ist mit dem Aufbau des in Kapital II.2.2. beschriebenen Photomultipliers verwandt.

[56] ND: Neutrale Dichte ; Technisches Maß für die Durchlässigkeit von Graufiltern (siehe auch Kapitel II.1.2.)

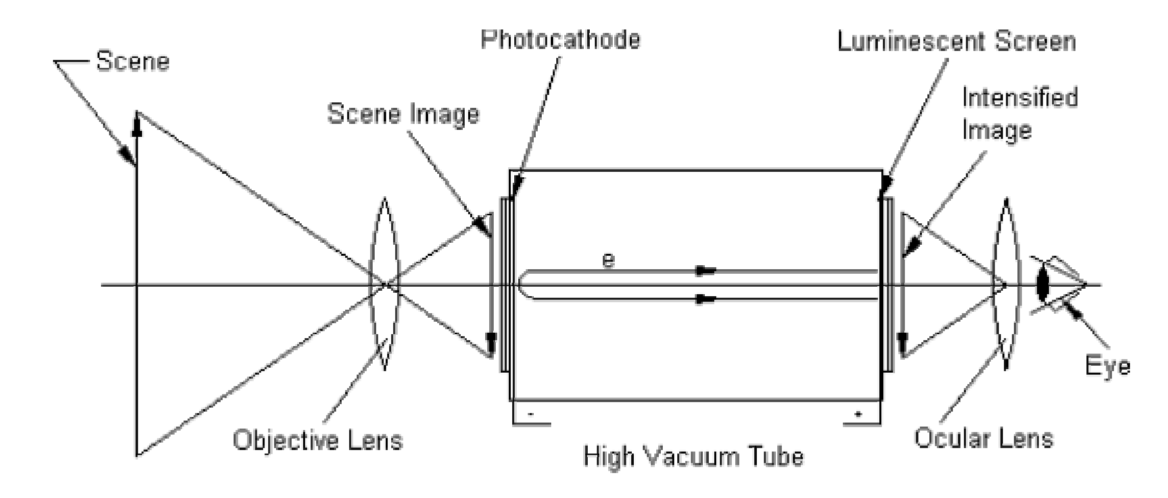


Abbildung 25: Grundprinzip des Bildverstärkers[57]

Die spektralen Eigenschaften des Bildverstärkers werden durch die Quantenausbeute der Photokathode bestimmt. Die einfallenden Photonen setzen in der Photokathode des Bildverstärkers elektrische Ladungen frei. Die Quantenausbeute ist definiert als das Verhältnis zwischen den einfallenden Photonen und den gebildeten Ladungen [Th03]. Der eingebaute Bildverstärker hat eine Bialkali-Photokathode. Die Quantenausbeute für verschiedene Kathodentypen ist in Abbildung 26 aufgetragen.

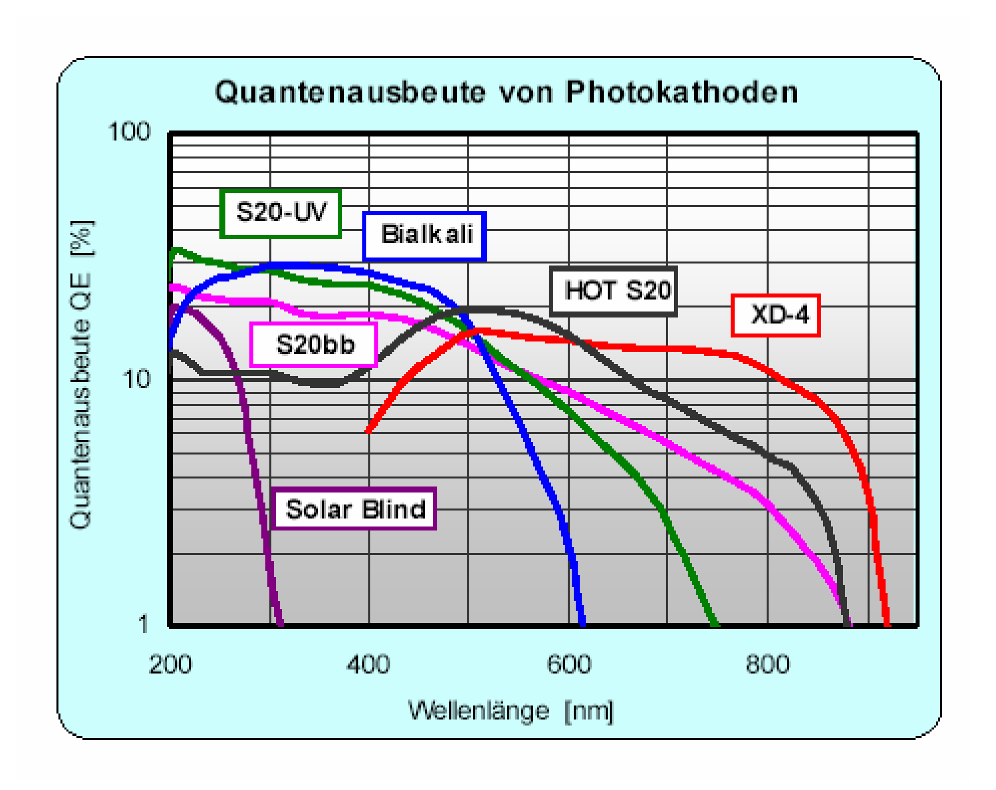


Abbildung 26: Quantenausbeute von Photokathoden[58]

---

[57] Bildquelle: www.proxitronic.de
[58] Bildquelle:[Th03]

Die Quantenausbeute der eingebauten Bialkali-Photokathode liegt für die eingesetzte Laser-Wellenlänge im Bereich von 1%. Das heißt von etwa $1{,}25 \cdot 10^7$ Photonen pro 100 ms, welche die Filter passieren und die Photokathode erreichen, verursachen nur etwa $1{,}25 \cdot 10^5$ Photonen pro 100 ms die Emission von Photoelektronen. Die Photoelektronen haben eine geringe kinetische Energie. Aufgrund der angelegten Hochspannung (+10kV an der Anode, Kathode geerdet) werden die Elektronen stark in Richtung der Anode beschleunigt. Zusätzlich werden sie noch fokussiert. Die Elektronen treffen mit hoher kinetischer Energie am anderen Ende der Vakuumröhre auf einen Lumineszenzschirm. Nach der Passage zweier Aluminiumschichten, welche Rückreflexionen in die Vakuumröhre verhindern sollen, treffen die Elektronen auf einen Phosphorschirm und stimulieren dort Fluoreszenz. Durch die Fluoreszenz werden in Abhängigkeit von den ankommenden Elektronen Photonen emittiert. Die Verteilung dieser Photonen entspricht exakt der Verteilung der einfallenden Photonen an der Photokathode. Der Bildverstärker hat also keinerlei Einfluss auf die Anordnung und das sich ergebende Muster der Photonen. Die eigentliche Bildverstärkung findet durch Verstärkung mittels Elektronen statt. Es handelt sich folglich genau genommen um einen Elektronenverstärker. Der eingebaute Verstärker ist ein Modell der zweiten Verstärkergeneration. Während in Verstärkern der ersten Generation lediglich die Energie der Elektronen durch den Beschleunigungsvorgang erhöht wird, wird bei der zweiten Generation zusätzlich die Zahl der Elektronen erhöht. Dies geschieht in der Microchannel plate (MCP) (Abb.27).

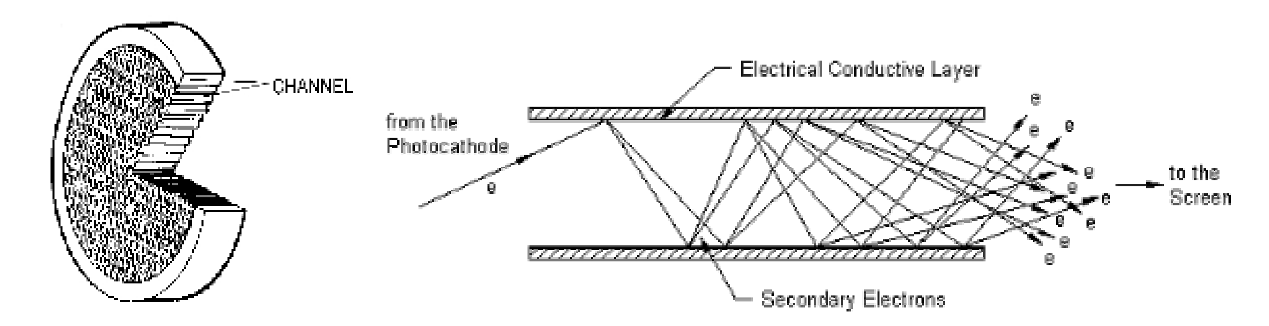


Abbildung 27: Microchannel-Plate (links) und Prinzip der Sekundärelektronemission (rechts)[59]

Die MCP ist zwischen Photokathode und Lumineszenzschirm in der Vakuumröhre eingebaut (Abb.28). In der MCP werden die einfallenden Elektronen so hoch verstärkt, dass sie als getrennte Treffer auf dem Lumineszenzschirm des Bildverstärkers erscheinen.

[59] Bildquelle: www.proxitronic.de

Die MCP besteht aus dünnen Glasplatten, in die sehr viele Kanäle eingearbeitet sind (in Abb.27 links). Die gesamte Platte erhält dadurch eine honigwabenartige Struktur. Die Kanäle haben einen Durchmesser von etwa 10 µm und eine Länge von etwa 10 mm. Etwa 60% der Elektronen treffen auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode einen diese Kanäle (in Abb.27 rechts). Die übrigen Elektronen treffen auf eine wand zwischen den Kanälen und erreichen den Lumineszenzschirm nicht. Jeder dieser Kanäle stellt einen Miniatur Elektronen Multiplier dar. Am Anfang und am Ende der Kanäle befinden sich Elektroden zum Anlegen einer Spannung. Die von Photomultiplier her bekannten Dynoden werden durch eine einzige halbleitende Oberfläche an der Innenseite der Kanäle ersetzt. Diese Schicht hat einen hohen Sekundäremissionskoeffizienten. Treffen die von der Photokathode kommenden Primärelektronen auf ihrem Weg durch die Kanäle auf die Wandoberfläche, so verursachen sie Sekundärelektronenemission. Um den Aufprall aller Primärelektronen zu garantieren, sind die Kanäle diagonal in die Platte eingearbeitet (Abb.28, links). Dadurch verursachen alle Primärelektronen die Emission von Sekundärelektronen. Es entsteht ein Elektronenschauer (Abb.27, rechts). Dadurch erhöht sich die Zahl der am Lumineszenzschirm auftreffenden Elektronen erheblich. Um die Lage des Photonenbildes nicht durch Abweichungen infolge der diagonalen Kanalführung zu verfälschen, verwendet man eine doppelte Microchannel Plate in V-Anordung. (siehe Abb.28 rechts)

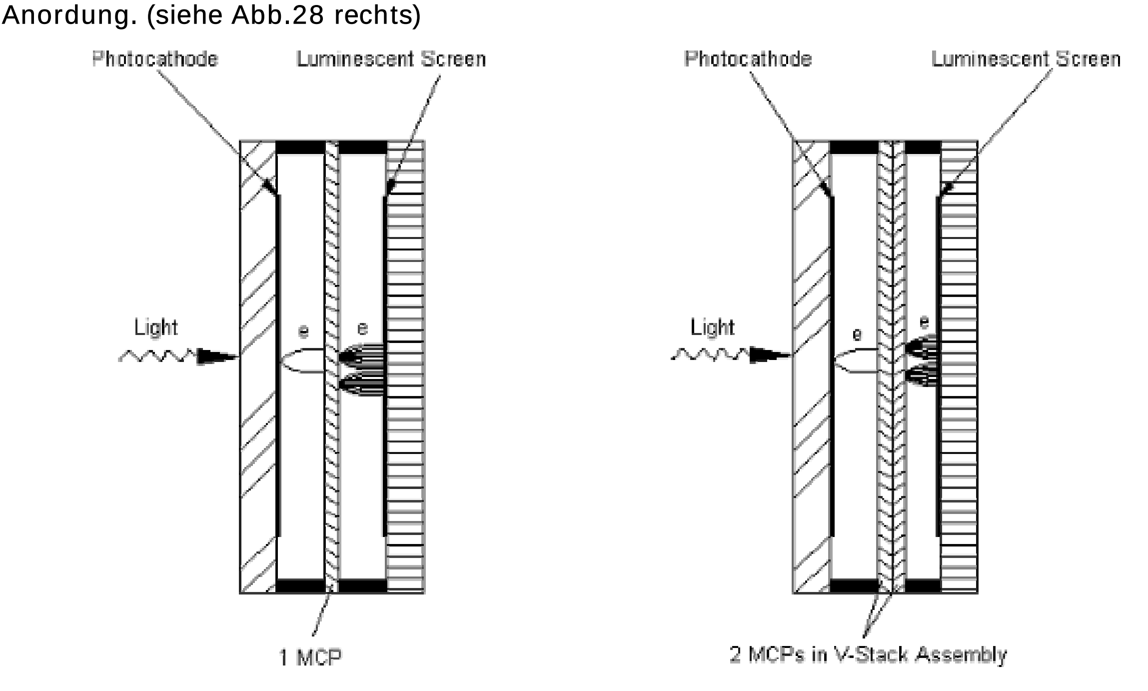


Abbildung 28: V-Anordung der doppelten MCP[60]

---

[60] Bildquelle: www.proxitronic.de

Durch diesen Trick wird die durch eine MCP verursachte räumliche Abweichung korrigiert. Das am Lumineszenzschirm entstehende Photonenbild bleibt in seiner Lage unverändert, ist allerdings gegenüber dem Eingangsbild verstärkt. Um die Verstauchung des entstehenden Bildes gering zu halten sind die Abstände zwischen Photokathode, MCP und Lumineszenzschirm möglichst klein gewählt. Man spricht von Proximity- bzw. Nahfokus-Bildverstärkern.

Der Bildverstärker ist über zwei Objektive direkt an die CCD-Kamera gekoppelt. Eingesetzt wird ein Pentax Fotoobjektiv mit 50 mm Brennweite. Das zweite Objektiv ist ein C-Mount[61] Objektiv der Brennweite 25mm von Pentax-Cosmicar. Durch ein einheitliches Auflagemaß, dem Abstand zwischen Chip und Auflagefläche des Objektivs, wird gewährleistet, dass der Brennpunkt des Objektivs genau auf der Chip-Oberfläche liegt.

4.3. Die CCD-Kamera

Abbildung 29: CCD-Kamerasystem mit Bildverstärker und verschiedenen Objektiven[62]

Das Herzstück des Kamerasystems (Abb.29) ist der CCD-Chip. Dieser Chip fungiert als Bildsensor und hat die Aufgabe, ein optisches Bild in ein Ladungsbild umzuwandeln. Er stellt die Schnittstelle zwischen dem realen Bild und dem elektrischen Bildsignal dar. Der Chip übernimmt die Rolle des Films bei der klassischen Kamera und bietet den Vorteil, dass das von

[61] C-Mount ist der Standard-Anschluss für Objektive an CCD-Kameras.
[62] Bildquelle: eigenes Foto

ihm gelieferte elektrische Bildsignal mit dem Computer verarbeitet werden kann. In der vorliegenden Kamera ist ein 2/3“ Chip eingebaut. Das Maß hat aber keinen Bezug zur realen Chip-Größe, sondern stellt den Bezug zu einer vergleichbaren Bildaufnahmeröhre her und entspricht dem Durchmesser des lichtempfindlichen Bereichs der Röhre. Das ladungsgekoppelte Bauelement (engl. charged coupled device) besteht aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Bildelemente, die matrixartig in Zeilen und Spalten auf einem Siliziumplättchen angeordnet sind. In den lichtempfindlichen Stellen werden die einfallenden Photonen im dotierten Siliziumkristall absorbiert und erzeugen dort aufgrund des inneren Photoeffekts des Siliziums Elektronen, welche ins Leitungsband gelangen. Durch umgebende Elektroden wird eine Struktur aus Ladungssenken und Ladungsbarrieren geschaffen, welche die entstehenden Elektronen räumlich fixiert. Die Anzahl der entstehenden Elektronen ist ein Maß für die Intensität des einfallenden Lichts. Jedes lichtempfindliche Element des CCD-Sensors baut seine Ladungsmenge auf und liefert damit das Rohmaterial für einen Pixel[63] des digitalen Bildes [Ki01]. Neben den lichtempfindlichen Stellen, dem Belichtungsbereich, besteht der CCD-Chip zusätzlich aus lichtundurchlässigen Stellen, dem Schieberegister (Abb.30). Das Auslesen der Ladungen erfolgt mit dem Interline-Transfer. Die durch die Belichtung entstandenen Ladungspakete werden durch periodische Potentialänderungen an der Elektrodenstruktur durch den Kristall geschoben.

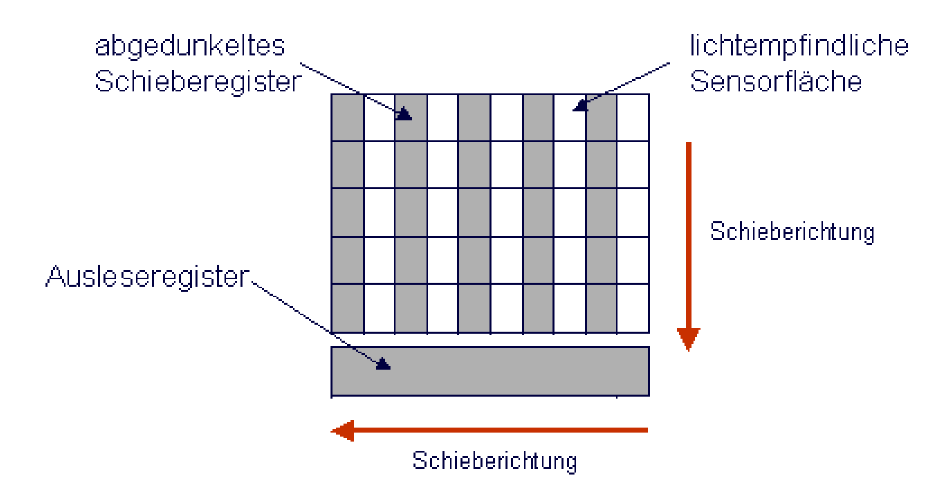


Abbildung 30: Aufbauprinzip des CCD-Chips[64]

Die in der lichtempfindlichen Sensorfläche erzeugten Ladungspakete werden horizontal in das abgedunkelte Schieberegister übernommen (Abb.31, links). Unmittelbar nach dem Ver-

[63] Pixel: Kunstwort aus „picture element“
[64] Bildquelle: www.ccd-sensor.de

schieben steht der lichtempfindliche Bereich wieder zur Verfügung und neue Ladungen können durch die nachfolgenden Photonen erzeugt werden. Die Ladungen im Schieberegister werden vertikal Zeile für Zeile in das Ausleseregister verschoben (Abb. 29, Mitte). Das Ausleseregister wird seriell abgearbeitet(Abb.29, rechts). Die Ladungen werden als Signal kapazitiv ausgekoppelt und an einen Analog-Digital-Wandler weitergeleitet. Die analogen Pixel-Inhalte werden so nacheinander gemessen und digital abgespeichert [Ki01]. In Abhängigkeit von der Ladungsmenge wird damit jedem Pixel ein Zahlenwert zugeordnet.

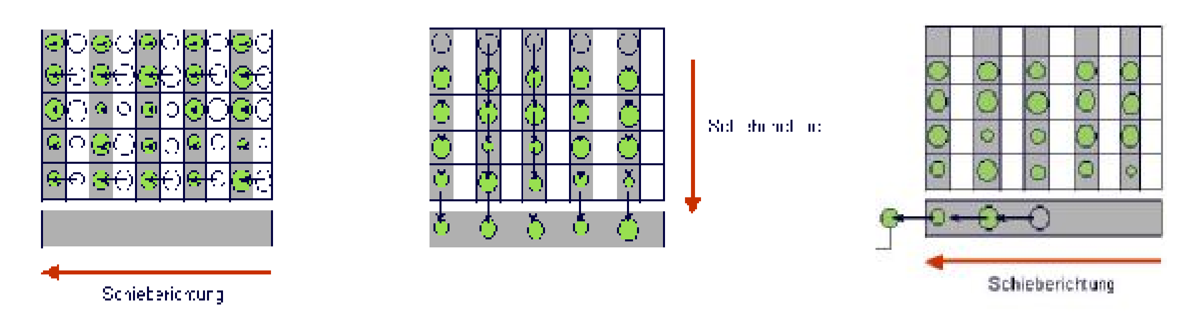


Abbildung 31: Die Phasen des Interline-Transfers[65]

„Wenn die einzelnen CCD-Sensoren so überlastet werden, dass einfallende Photonen die Spannung nicht weiter erhöhen können, weil das maximale Potential (full well capacity) erreicht ist, fließen die überschüssigen Ladungen an benachbarte Pixel ab und verschmieren das Bild. Dieser Vorgang wird als Blooming bezeichnet. Da beim vorgestellten Versuch die Intensitäten sehr gering und die Belichtungszeiten sehr kurz sind, treten keine erkennbaren Blooming-Probleme auf.

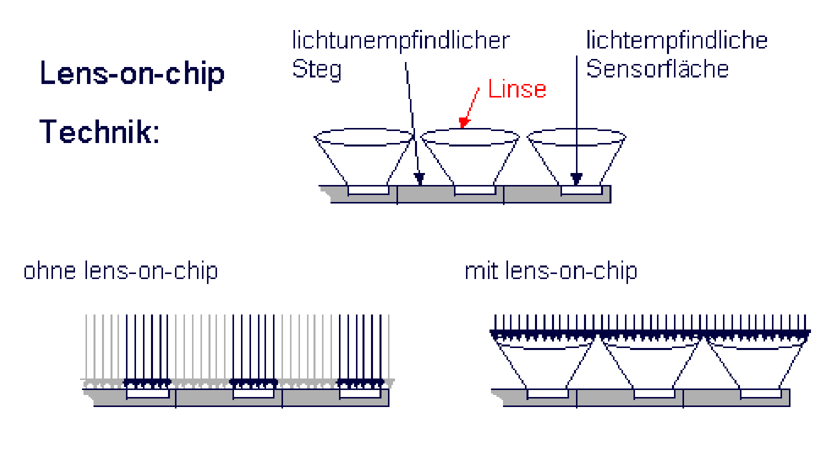


Abbildung 32: Lens-on-Chip Technik[66]

---

[65] Erläuterung: Die grünen Kreise stellen Ladungspakete dar.
Bildquelle: www.ccd-sensor.de

[66] Bildquelle: www.ccd-sensor.de

Wegen des Streifenmusters aus Sensorfläche und Schieberegister ist nur ein Teil der Oberfläche des CCD-Chips lichtempfindlich(Abb. 32, oben). Ein Großteil des auf den Chip auftreffenden Lichts bleibt ungenutzt (Abb. 32, unten links). Um auch diesen Teil des einfallenden Lichts detektieren zu können, wird die „Lens on chip“-Technik angewandt. Auf dem Chip werden sehr kleine Linsen aufgebracht, die das Licht, das ohne Linsen die Ausleseregister treffen würde, auf die lichtempfindlichen Bereiche ablenkt (Abb 32, unten rechts). Dadurch wird die Lichtausbeute gesteigert.

4.4. Kamerasteuerung und Bilddarstellung

Die CCD-Kamera wird mittels des Computer-Programms WinSIS[67] – kurz für „Scientific Imaging System for Windows“ – gesteuert. Neben der Steuerung der Kamera werden alle zur Bilddarstellung notwendigen Applikationen in WinSIS zur Verfügung gestellt. Das Datensignal der CCD-Kamera wird mittels einer Fire-Wire-Verbindung an den Rechner übermittelt. Mit einer Bandbreite von 800 Mbit/s garantiert die Fire-Wire Technologie einen schnellen Datentransfer auch bei größeren Datenmengen und längeren Übertragungswegen. Die Datenbereitstellung erfolgt gleichmäßig und in Echtzeit. Die Daten werden in einen Zwischenspeicher, den so genannten Framegrabber geschrieben. Der Framegrabber muss an den jeweiligen Kameratyp angepasst sein. Mit Hilfe eines Image Servers („ISERFIRE“)[68] werden die im Framegrabber gespeicherten Daten in ein mit WinSIS kompatibles Dateiformat umgewandelt. Der Image Server ist die Schnittstelle zwischen Kamerahardware und Steuerungssoftware. Mit ISERFIRE kann eine Vielzahl verschiedener Datenformate gelesen werden. Dadurch ist es möglich verschiedene Kameratypen mit WinSIS zu steuern. Die Einstellungen des Image Servers sind für die angeschlossene Kamera optimiert. Die Bilddaten werden in die Bilddatei „*ISERFIRE#1“ geschrieben. Die in „*ISERFIRE#1“ gespeicherten Daten bilden die Grundlage der Bilddarstellung. Die Bilder können direkt als Livebild im, zu „*ISERFIRE#1“ gehörenden, Bilddarstellungsfenster angezeigt werden. Ferner werden für alle weiteren Bilddarstellungsapplikationen die benötigten Bilddaten aus „*ISERFIRE#1“ akquiriert.

---

[67] Hersteller: Theta-System Gröbenzell (siehe auch Anhang Herstellernachweis)
[68] Hersteller: Theta-System Gröbenzell (siehe auch Anhang Herstellernachweis)

Die Verwaltung der Bilddateien erfolgt im Image Manager. Dieser ermöglicht die Generierung neuer Bilddateien, die Veränderung der Eigenschaften bereits bestehender Bilddateien und das Löschen von Bilddateien. Die Bilddateien können gespeichert werden, bzw. bereits gespeicherte Bilddateien neu geladen werden. In einer Liste, an deren Spitze stets „*ISERFIRE#1" steht, werden alle aktuell geladenen Bilddateien aufgelistet. Für die jeweils aktivierte Datei werden die wichtigsten Bilddaten aufgelistet, sowie ein Vorschaubild angeboten.

Bei den Bilddateien ist zwischen zwei Arten zu unterscheiden. Zum einen die „normale" Bilddatei, in der nur das jeweils aktuelle Bild angezeigt und gespeichert werden kann. Zum anderen „Sequenz-Dateien", die die Aufnahme von kurzen Bildsequenzen ermöglichen. Mehrere aufeinander folgende Bilder können damit als Film gespeichert und abgespielt werden. Die Bilddateien können in unterschiedlichen Dateitypen gespeichert werden. Für die vorgestellte Versuchanordnung sind nur die Typen „U16" und „U32"[69] von Bedeutung, wobei Sequenzdateien im „U32" Typ gespeichert werden.

Bilddarstellung

Die eigentliche Bilddarstellung aller Dateien erfolgt in eigenen Fenstern. Die Darstellung kann in der Größe variiert werden, insbesondere ist die Auswahl selbst definierter Bildausschnitte möglich. Dadurch können die interessierenden Bereiche vergrößert dargestellt werden. In der Grundeinstellung wird das Bild in Graustufen wiedergegeben, um die Bereiche unterschiedlicher Intensität zu unterscheiden. Dabei wird jedem Zahlwert, den die einzelnen Pixel in Abhängigkeit vom einfallenden Licht zugewiesen bekamen, eine Graustufe zugeordnet. Mit Hilfe der Graustufenskalierung werden die unterschiedlichen Intensitäten der Bilder dargestellt. Neben dieser Graustufendarstellung ist auch eine farbige Darstellung möglich. Dazu stehen verschiedene Farbpaletten zur Auswahl.

Es kann zwischen zwei unterschiedlichen Darstellungsarten ausgewählt werden. Einerseits kann eine linear skalierte Darstellung gewählt werden. Dazu müssen die gewünschten Grenzen der linearen Skalierung eingestellt werden; entweder zwischen dem Intensitätsminimum[70] und dem Intensitätsmaximum (MinMax bzw. Max) oder zwischen frei gewählten Grenzen (Range). Der gewählte Intensitätsbereich wird dann auf 256 Stufen linear skaliert und in der eingestellten Graustufen- oder Farbskala dargestellt. Pixel mit Intensitäten jen-

[69] „U16" und „U32" sind 16- bzw. 32-Bit-Integer Dateien
[70] In der Regel bei diesem Versuch meist Null

seits der gewählten Grenzen werden in der jeweiligen Farbe dargestellt, die das eingestellte Spektrum nach oben bzw. unten hin abschließt.
Alternativ dazu kann die Bit-Ebenen-Darstellung (Slice) gewählt werden. Die Bildinformationen werden von der Kamera intern in verschiedenen Bit-Ebenen abgespeichert. Dieses Ebenen werden schichtweise zusammengesetzt, so dass ein dreidimensionales Intensitätsprofil entsteht. Die x- und y-Koordinaten enthalten dabei die Ortsinformation, die z-Koordinaten geben die Intensitätswerte an. Bei der Slice-Darstellung wird dieses 3D-Profil horizontal geschnitten, das heißt eine dieser Ebenen wird ausgewählt. Der Slice-Wert gibt dabei die Nummer der ausgewählten Bit-Ebene an. Ausgehend von dieser Ebene werden die nächsten sieben darüber liegenden Ebenen gemeinsam dargestellt. Bei der Einstellung Slice 4 werden zum Beispiel die Bitebenen 4 bis 11 dargestellt.
Die CCD-Kamera kann als Videokamera oder als Fotoapparat betrieben werden. Wird die Darstellung einer Live-Aufnahme ausgewählt, werden die Kameradaten permanent in die geöffnete Bilddatei geschrieben, wobei die jeweiligen Vorgängerbilder überschrieben werden. Das aktuelle Bild ist live im Darstellungsfenster zu sehen. Die Anzahl der aufgenommenen Einzelbilder wird angezeigt. Die CCD-Kamera arbeitet in diesem Modus nach dem Prinzip einer Videokamera. Alternativ zur Live-Aufnahme kann ein „Schnappschuss" aufgenommen werden. Die CCD-Kamera arbeitet hierbei wie ein Fotoapparat.
Es besteht die Möglichkeit, zuvor abgespeicherte Bilder vom aktuellen Bild abzuziehen oder hinzu zu addieren. Dadurch können z. B. konstante Streulichteffekte in der Darstellung unterdrückt werden.
Eine weitere Option bietet das Akkumulieren einzelner Live-Bilder. Bevor die Bilddaten von dem nächsten Livebild überschrieben werden, werden sie in eine Akkumulationsdatei kopiert. In der Akkumulationsdatei werden alle Einzelbilder zusammenaddiert. Gleichzeitig kann die Abfolge der Einzelbilder als Filmsequenz, in einer zuvor generierten Sequenzdatei gespeichert werden. Die Filmsequenz kann erst nach Aufnahme der kompletten Sequenz abgespielt werden.
Sowohl die Live-Aufnahmen als auch die „Schnappschüsse" werden im SIS-Format, dem WinSIS Standardbildformat, abgespeichert. WinSIS bietet zusätzlich die Möglichkeit, Bilder in den bekannten Formaten TIFF, BMP und JPEG, sowie ASCII zu speichern.

In den Live-Bildern und auch in abgespeicherten Bilddateien kann im Darstellungsfenster eine ROI (Region of Interest) definiert werden. Die ROI ist üblicherweise eine Zeile oder Spalte. Frei definierte Geraden, Polygonzüge oder zweidimensionale Felder sind aber ebenfalls möglich.
Ferner bietet WinSIS die Möglichkeit die Intensitätsverteilungen ausgewählter Spalten oder Zeilen anzuzeigen. Neben dieser zweidimensionalen Darstellungsmöglichkeit der Intensitätsverteilung kann die Intensitätsverteilung des gesamten Bildes dreidimensional dargestellt werden.

5. Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen

Mit dem in Kapitel II.4. beschriebenen Versuchsaufbau (Abb.33) ist es möglich den Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen durchzuführen. Das Experiment wurde in Anlehnung an die historischen Versuche von Jönsson und Taylor[71] entwickelt, um das Verhalten einzelner Photonen am Doppelspalt mit Hilfe der CCD-Kamera untersuchen zu können.

Abbildung 33: Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen[72]

Wird der Versuch mit voller Laserleistung und ohne zusätzliche Graufilter durchgeführt, zeigt sich das bereits bekannte Doppelspaltinterferenzmuster. Gemäß der quantenphysikalischen Theorie tritt dieses Muster auch bei geringeren Lichtintensitäten auf. Nur ein Teil der vom Laser ausgesandten Photonen passiert den Doppelspalt. Anschließend wird der Laserstrahl durch verschiedene Graufilter abgeschwächt. Aufgrund der Quantenausbeute des Bildverstärkers, die kleiner als 100% ist, werden nicht alle Photonen, die den Bildverstärker erreichen, detektiert. Mit Hilfe des Makros „Single Photon Imaging“ (kurz SPI) bietet WinSIS die Möglichkeit diese einzelnen Photonen zu detektieren. Mit Hilfe einer oberen und unteren Grenze (Lower Limit, Upper Limit) kann störender Untergrund und das thermische Rauschen des Bildverstärkers herausgefiltert werden. Beides wird zwar weiterhin durch die Kamera detektiert, allerdings ermöglicht die Bilddarstellung eine einwandfreie Unterscheidung zwischen relevanten und nicht relevanten Ereignissen. Bei Darstellung des Livebildes in der Slice-Einstellung werden die nicht relevanten Ereignisse mit sehr niedrigen Intensitäten dargestellt. Den relevanten Ereignissen wird für die Darstellung die maximale Intensität zu-

---

71 vgl. Kapitel I.3.8 und I.3.9.
72 Bildquelle: eigenes Foto

gewiesen. Daher erscheinen diese Photonen stets in der Grenzfarbe des gewählten Darstellungsspektrums. Durch diesen Trick in der Bilddarstellung heben sich die relevanten Photonen deutlich vom Untergrund ab. Zusätzlich ist es in der Slice-Darstellung möglich, durch geeignete Wahl des Profilschnitts den Untergrund auszublenden. Bei höheren Slice Einstellungen werden so lediglich die relevanten Photonen dargestellt, die intern die maximale Intensität zugewiesen bekommen haben.

Man erwartet auf dem Schirm das bekannte Interferenzmuster. Das Muster erscheint aber aufgrund der geringen Photonenanzahl nicht mehr als kontinuierliche Struktur. Lediglich das Auftreffen einzelner Photonen ist im Livebild zu erkennen. Der Teilchencharakter des Lichts wird in jedem einzelnen Treffer der Photonen deutlich. Die Trefferspots der einzelnen Photonen erstrecken sich über wenige Pixel. Die Wechselwirkung zwischen den auftreffenden Photonen und der Photokatode des Bildverstärkers erfolgt streng lokalisiert. Ein typisches Verhalten von Teilchen. Eine Welle ist dagegen über einen größeren Bereich ausgedehnt. Sie würde ihre Energie auf viele Pixel verteilen. Das Interferenzmuster wäre vorhanden.

Abbildung 34: Bildreihe: Einzelne Photonen detektiert hinter dem Doppelspalt[73]

In dieser Einstellung im SPI-Modus ist es folglich möglich, den Teilchencharakter des Lichts experimentell nachzuweisen. Die einzelnen Photonen erscheinen ohne erkennbare Ordnung bezüglich ihrer Position und ihrer Anzahl auf dem Schirm (Abb. 34). Nach der quantenphysikalischen Theorie verteilt sich die Anzahl der pro Aufnahme auftreffenden Photonen nach der Poisson-Verteilung:

$$P(X=k)=\frac{l^{k}}{k!}e^{-l} \qquad (10)$$

Die Wahrscheinlichkeit P(X = k), dass k Photonen bei einer Aufnahme detektiert werden, ist abhängig vom Erwartungswert λ der Verteilung. Der Erwartungswert ist der erwartete Mittelwert der Photonenanzahl pro Aufnahme.

---

[73] Bildquelle: WinSIS-Screenshot des Darstellungsfensters

Die experimentellen Bedingungen sind durch die Wahl der Graufilter und des Bildverstärkers, sowie die Einstellung der Darstellungsgrenzen (Lower Limit, Upper Limit) so gewählt, dass im Mittel ein Photon pro Aufnahme erwartet wird. Daher wird für die erwartete Poisson-Verteilung der Erwartungswert $\lambda=1$ setzt. Untersucht wurde in mehreren Messreihen die Anzahl der auftreffenden Photonen pro Aufnahme (Tabelle 1). Gelistet wurde die Anzahl der Aufnahmen mit der jeweiligen Photonenanzahl. Aus der Gesamtsumme der Aufnahmen und der Gesamtsumme der in diesen Aufnahmen im Verlauf der Messreihe detektierten Photonen kann der Mittelwert für die Anzahl der detektierten Photonen pro Ereignis errechnet werden. Zusätzlich zu den drei einzelnen Messreihen wurden die Ergebnisse der Messreihen aufaddiert.

Anzahl der detektierten Photonen	0	1	2	3	4	5	Σ der Ereignisse	Σ der Photonen	Mittelwert: Photonen pro Ereignis
Anzahl der Ereignisse (1.Messreihe)	192	148	65	21	3	1	430	358	0,832
Verteilung der Ereignisse (in %)	44,7	34,4	15,1	4,9	0,7	0,2	100,0		
Anzahl der Ereignisse (2.Messreihe)	198	196	84	33	10	4	525	523	0,996
Verteilung der Ereignisse (in %)	37,7	37,3	16,0	6,3	1,9	0,8	100,0		
Anzahl der Ereignisse (3.Messreihe)	148	165	84	20	5	3	425	428	1,007
Verteilung der Ereignisse (in %)	34,8	38,8	19,8	4,7	1,2	0,7	100,0		
Summe der Ereignisse	538	509	233	74	18	8	1380	1308	0,948
Verteilung der Ereignisse (in %)	39	36,9	16,9	5,3	1,3	0,6	100,0		
Theoretische Poisson-Verteilung (in %)	36,8	36,8	18,4	6,1	1,6	0,3	100,0		1

Tabelle 1: Messreihen: Anzahl detektierter Photonen

Die Messreihen werden mit der theoretisch erwarteten Poisson-Verteilung[74] verglichen. In Abbildung 35 wird die Verteilung der Ereignisse gegen die Anzahl der Photonen pro Ereignis aufgetragen.

[74] Berechnet mit Formel (10); Poisson-Verteilung für Erwartungswert 1

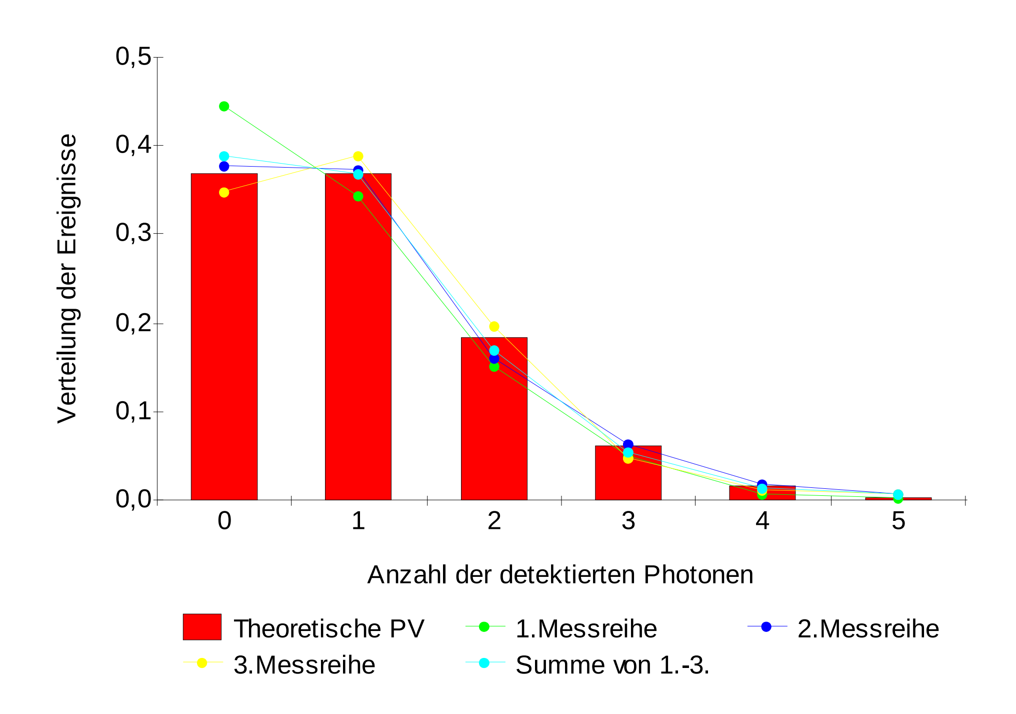


Abbildung 35: Verteilung der Anzahl der Photonentreffer pro Aufnahme

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung entsprechen in guter Näherung den theoretisch erwarteten Ergebnissen. Der stochastische Charakter des Quantenphänomens Licht wird bei dieser Untersuchung der Versuchergebnisse deutlich.

Alle Photonen, die in der Live-Aufnahme angezeigt werden, können in einem Akkumulationsspeicher aufaddiert werden. Betrachtet man nun die Darstellung des Akkumulationsspeichers kurz nach Beginn des Versuchs, so ist noch kein Muster erkennbar. Die Auftreffpunkte der einzelnen Photonen sind scheinbar völlig unkoordiniert auf dem Schirm des Bildverstärkers verteilt (Abb. 36).

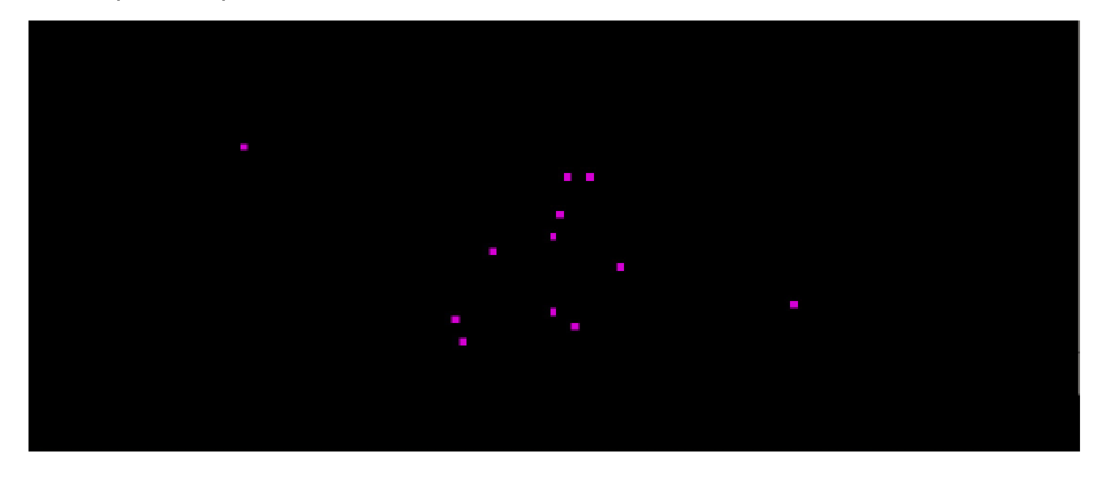


Abbildung 36: Bildausschnitt der Akkumulationsdatei [75]

[75] Bildquelle: WinSIS-Screenshot des Darstellungsfensters

Versucht man die Position des jeweils nächsten Photonentreffers exakt vorherzusagen, wird man wenig Erfolg haben. Der Ort eines einzelnen Photons wird vom Zufall bestimmt. Nach der Theorie der Quantenmechanik können über Einzelereignisse nur statistische Aussagen getroffen werden. Auf die Photonentreffer bezogen kann man also lediglich eine Wahrscheinlichkeit angeben, dass der nächste Treffer in einem bestimmten Bereich erfolgt. Alle Photonen wurden auf die gleiche Weise präpariert. Sie haben die gleiche Energie und wurden von der Quelle in der gleichen Weise am selben Ort emittiert. Trotzdem landen die Photonen nicht an der gleichen Stelle, das einzelne Ergebnis ist nicht reproduzierbar. Die Physik ist an dieser Stelle nicht mehr deterministisch. Zwischen den Photonen, die in der Quelle präpariert wurden, und dem Doppelspalt finden Wechselwirkungen statt. Aufgrund dieser Wechselwirkungen verändert sich der präparierte Zustand der Photonen. Die Verteilung der Photonentreffer wird auch *Wahrscheinlichkeitsdichte P(x)* bezeichnet.

Nach einiger Zeit bilden die Treffer der Photonen Häufungspunkte. Eine Struktur kann in diesem Stadium unter Umständen schon hineininterpretiert werden (Abb. 37).

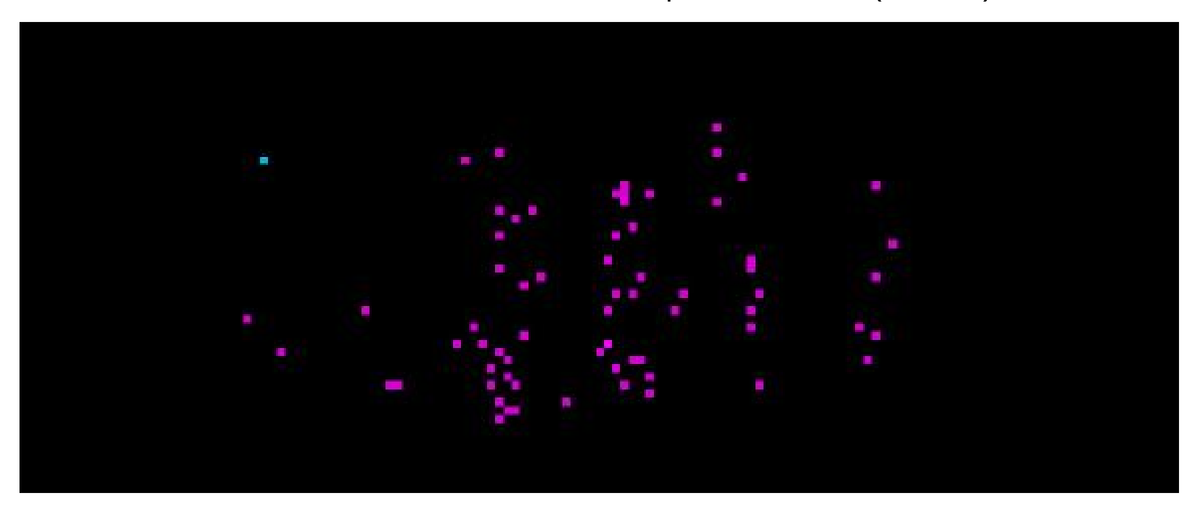


Abbildung 37: Bildausschnitt der Akkumulationsdatei[76]

Mit jedem Einzelbild wird die Struktur der Photonentreffer deutlicher. Eine vertikale streifenförmige Anordnung der Photonentreffer wird erkennbar. Es gibt Regionen mit vielen Einzeltreffern und Bereiche ohne Photonentreffer. Dieses Muster kann auf Basis der Wellentheorie durch konstruktive und destruktive Interferenz erklärt werden. Aus den einzelnen Photonentreffern entsteht langsam ein Muster, das auf die Welleneigenschaften des Lichts zurückgeführt wird (Abb. 38).

---

[76] Bildquelle: Screenshot des Darstellungsfensters der Akkumulationsdatei

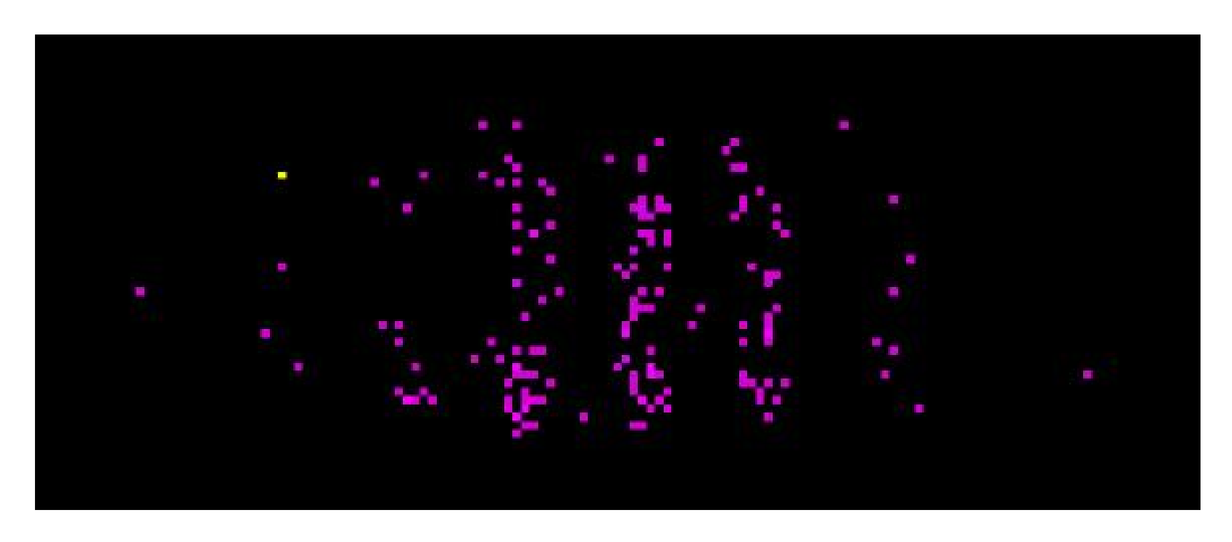


Abbildung 38: Bildausschnitt der Akkumulationsdatei[77]

Mit jedem Treffer wird das erwartete Interferenzstreifenmuster deutlicher erkennbar. Das Aussehen des Interferenzmusters hängt ausschließlich von der Gesamtzahl der auftreffenden Photonen ab. Die Auftreffrate ist unerheblich. Auch wenn zu jedem Zeitpunkt nur ein Photon den Detektor erreicht, sagt die Wellentheorie das bekannte Interferenzmuster voraus. Die Entstehung dieses Musters wird im Zeitraffer (Abb.39) deutlich. Die erste Aufnahme entsteht nach der Akkumulation von etwa 9000 Einzelbildern, die weiteren Aufnahmen basieren auf 12500 bzw. 20000 akkumulierten Einzelbildern. Die letzte Aufnahme zeigt das Ergebnis nach 45000 Einzelbildakkumulationen.

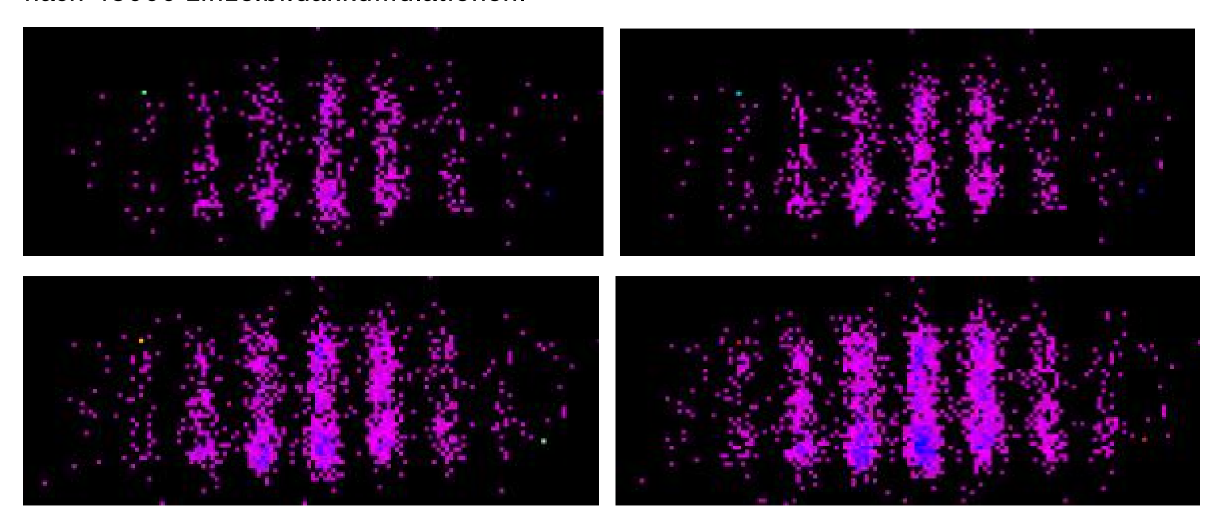


Abbildung 39: Die Entstehung des Interferenzmusters im Zeitraffer[78]

Der Auftreffpunkt eines einzelnen Photons ist nicht deterministisch. Ein Ensemble einzelner Photonen erzeugt dagegen nach der Wechselwirkung mit dem Doppelspalt eine reproduzierbare Verteilung. Statistisch gesehen ist die relative Häufigkeit der an einem Ort nachgewie-

[77] Bildquelle: Screenshot des Darstellungsfensters der Akkumulationsdatei
[78] Bildquelle: WinSIS-Screenshots des Darstellungsfensters der Akkumulationsdatei

senen Photonen vorhersagbar. Die Anzahl der Photonen an bestimmten Orten des Schirms ist proportional zur Gesamtanzahl der Photonen, d.h. man kann mit hoher Zuverlässigkeit vorhersagen, an welchen Orten viele Photonentreffer zu verzeichnen sein werden, und an welchen wenige. Die Wahrscheinlichkeitsdichte P(x) ist groß an Orten mit hoher Trefferquote und klein an Orten mit wenigen Treffern. In der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation wird das Verhalten der Photonen mathematisch quantitativ charakterisiert. Mit Hilfe der Wellenfunktion kann die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in einem Volumenelement ΔV um den Ort x nachzuweisen, bestimmt werden.

Nach ausreichend langer Akkumulationszeit ist das Interferenzmuster eindeutig zu erkennen (Abb.40). Für jeden Photonentreffer auf einem Pixel erhöht sich der Intensitätswert dieses Pixels um eins. Um die Struktur des Musters optisch besser zu illustrieren, können verschiedene Farbskalen eingesetzt werden. Diese Kolorierung zeigt die Häufigkeit der Treffer in einem Pixel (rot: viele Treffer; blau: wenig Treffer). Zusätzlich wird das Muster deutlicher, wenn man für das Akkumulationsbild die Bit-Ebenen-Darstellung wählt. Bei der Einstellung Slice 0 werden alle Pixel dargestellt, die mindestens einen Treffer erhalten haben. Das heißt ihre Intensität ist größer als Null. Bei Slice 1 werden nur noch die Pixel mit einer Mindestintensität von I=2 dargestellt. Bei Slice 2 werden alle Pixel mit Intensität größer als 4 angezeigt. Allgemein berechnet sich die Intensitätsgrenze der jeweiligen Slice-Nummer n mit $I = 2^n$. Dank dieser technischen Darstellungstricks, die in keiner Weise die Bilddatei verändern, ist in Abbildung 40 das in der Mitte des Streifenmusters liegende so genannte Nullte Interferenzmaximum erkennbar. Rechts und links dieses Hauptmaximums sind Bereiche mit wenigen, stellenweise sogar überhaupt keinen Treffern erkennbar. An diese Minima-Bereiche schließen sich nach rechts und nach links weitere Interferenzmaxima an; jeweils durch Minima voneinander getrennt. Die Nummerierung der Maxima erfolgt von der Mitte nach außen hin ansteigend. Neben dem Nullten Maximum sind in Abbildung 40 auch die ersten, zweiten und dritten Maxima nach rechts und links gut zu erkennen. Die vierten Maxima sind nur fragmentarisch zu erkennen. Die abgedruckte Aufnahme (Abb.40) entstand nach der Aufakkumulation von insgesamt etwa 500.000 Einzelbildern.

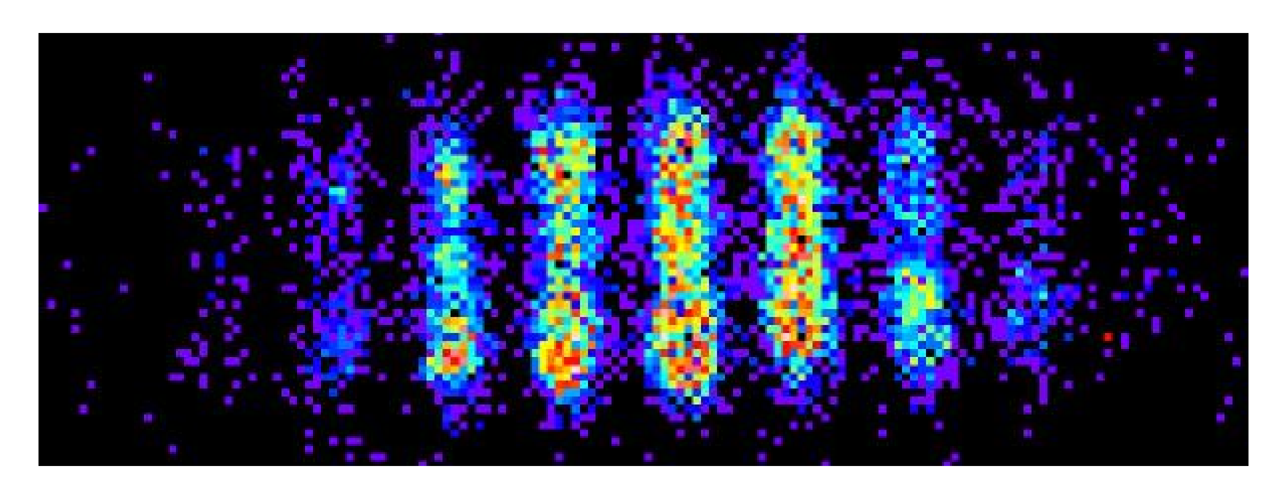


Abbildung 40: Akkumulation von etwa 500.000 Einzelbildern[79]

Das Interferenzmuster besteht deutlich erkennbar aus einzelnen Photontreffern, die sich trotz der Zufälligkeit ihres Ankommens im zeitlichen Mittel in den bekannten Interferenzstreifen anordnen. Um diese These zu untermauern untersuchen wir die Intensitätsverteilung des entstandenen Bildes und vergleichen diese mit der theoretischen Verteilung gemäß der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Als Intensität gibt WinSIS die Anzahl der Photonentreffer pro Pixel an. Man kann sich Intensitätsverteilungen zeilen- und spaltenweise anzeigen lassen. Ferner können die Werte der Intensitätsverteilung als ASCII-Export weiterverarbeitet werden. Um eine Intensitätsverteilung des gesamten Streifenmusters zu erhalten, wurde im Endbild zeilenweise zwischen den beiden roten Linien die Intensität vermessen (Abb.41). Insgesamt wurden 160 Zeilen ausgelesen.

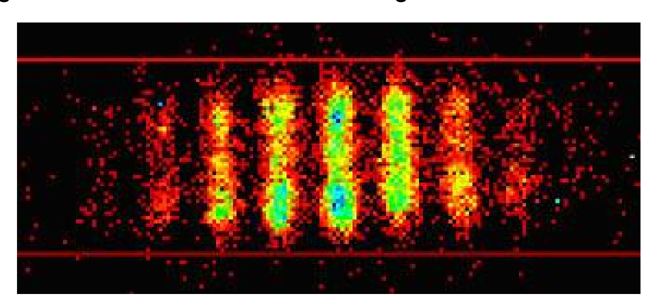


Abbildung 41: Bereich der Intensitätsmessung[80]

Die erhaltenen Werte wurde als ASCII-Export in eine Exceltabelle geschrieben, so dass eine Matrix der Intensitätsverteilung entstand. Die Intensitätswerte der einzelnen Spalten werden aufaddiert. Die Spaltennummer (x-Achse) wird gegen diese aufaddierten Intensitätswerte (y-Achse) aufgetragen. Es ergibt sich die folgende Intensitätsverteilung (Abb. 42):

---

[79] Bildquelle: Screenshot des Darstellungsfensters der Akkumulationsdatei
[80] Bildquelle: Screenshot des Darstellungsfensters der Akkumulationsdatei

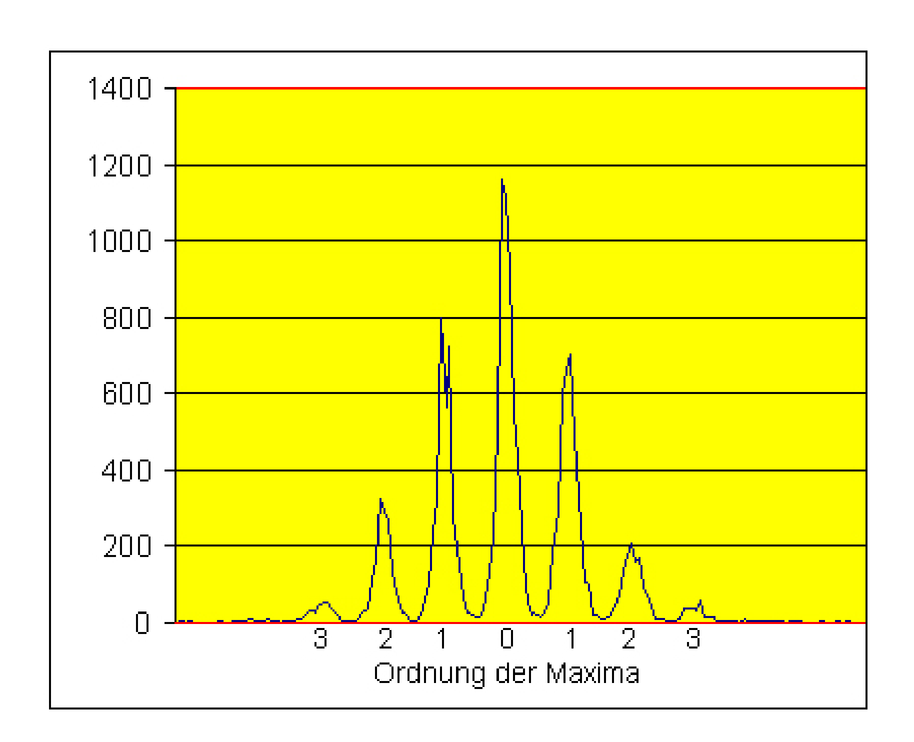


Abbildung 42: Intensitätsverteilung

Die Werte der y-Achse entsprechen der Anzahl der Ereignisse, die in der jeweiligen Spalte detektiert wurden. Deutlich erkennbar ist das Intensitätsmaximum nullter Ordnung in der Mitte. Hier befindet sich folglich der Bereich mit den meisten Photonentreffern. Auch die jeweils ersten drei Maxima rechts und links davon sind sehr gut erkennbar. Zwischen den Maxima liegen deutliche Minima, Bereiche mit sehr wenigen Photonentreffern.

Die theoretische Intensitätsverteilung für das Doppelspaltinterferenzbild auf dem Schirm wird mit Formel (11)[81] berechnet:

$$I = 4 \cdot I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{1}{2}\Phi\right)}{\frac{1}{2}\Phi} \right)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{1}{2}d\right) \quad (11)$$

Wobei ϕ die Phasendifferenz zwischen den Strahlen von der oberen und unteren Kante jedes einzelnen Spaltes ist:

$$\Phi = \frac{2 \cdot p}{l} \cdot d \cdot \sin(a) \quad (12)$$

und δ die Phasendifferenz der Strahlen, die von den Mittelpunkten beider Spalten kommen:

$$d = \frac{2 \cdot p}{l} \cdot a \cdot \sin(a) \quad (13)$$

[81] Formel (11), (12) und (13) entnommen aus [Ti94, S.1130]

Setzt man die Formeln (12) und (13) in Formel (11) ein, so erhält man für die Intensitätsverteilung bei der Beugung am Doppelspalt die Formel:

$$I(a) = 4 \cdot I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{p}{l} \cdot a \cdot \sin(a)\right)}{\frac{p}{l} \cdot a \cdot \sin(a)} \right)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{p}{l} \cdot d \cdot \sin(a)\right) \quad (14)$$

mit

I_0: Lichtintensität auf dem Schirm, die von der Welle von einem einzelnen Spalt herrührt.

λ: Wellenlänge des Lichts

a: Spaltbreite

d: Spaltabstand

α: Beugungswinkel

Für die experimentellen Daten des aufgebauten Versuchs ergibt sich nach Formel (14) folgende Intensitätsverteilung (Abb.43):

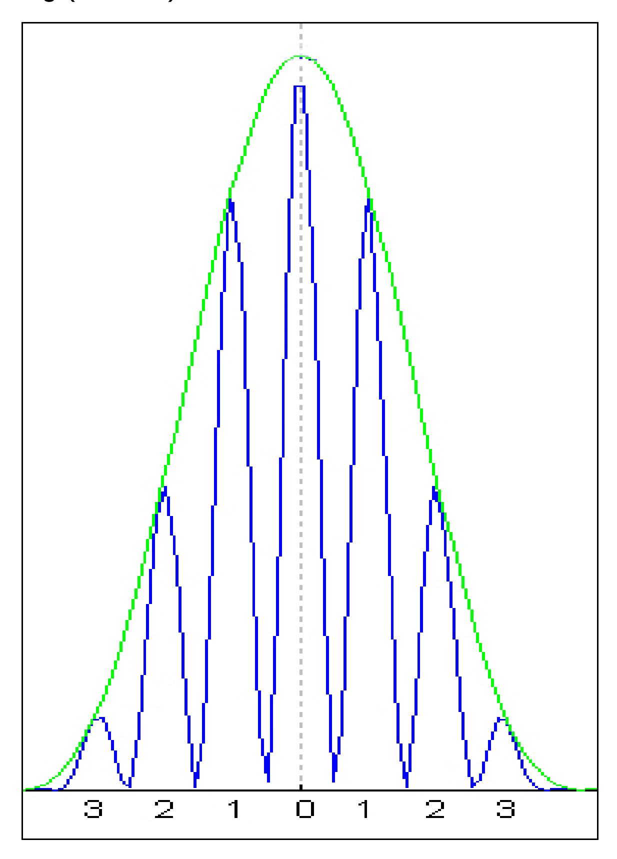


Abbildung 43:Theoretische Intensitätsverteilung

In Abbildung 43 ist die Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel aufgetragen. Die Intensitätsverteilung für das Interferenzbild am Doppelspalt ist blau dargestellt, in grün dar-

stellt ist die Intensitätsverteilung für das Beugungsbild am Einzelspalt. Die Einzelspaltverteilung ist die Einhüllende der Doppelspaltverteilung dar. Die Verteilung ist gemeinschaftliches Resultat der Beugung an den Einzelspalten und das Interferenz am Doppelspalt.

Der Vergleich der experimentellen Ergebnisse (Abb.42) mit der theoretischen Intensitätsverteilung für das Beugungsbild eines Doppelspaltes (Abb.43) bestätigt die Annahme, dass das entstandene Streifenmuster das Resultat von Interferenzerscheinungen am Doppelspalt ist.

Um die intensitätsschwachen Maxima 4. Ordnungen graphisch darstellen zu können, wurde der Graph der experimentell ermittelten Intensitätsverteilung nochmals mit einer logarithmischen Achseneinteilungen auf der y-Achse gezeichnet. Die Maxima hoher Ordnung mit geringeren Intensitäten sind dank der logarithmischen Intensitätsskala hier besser erkennbar (Abb.44).

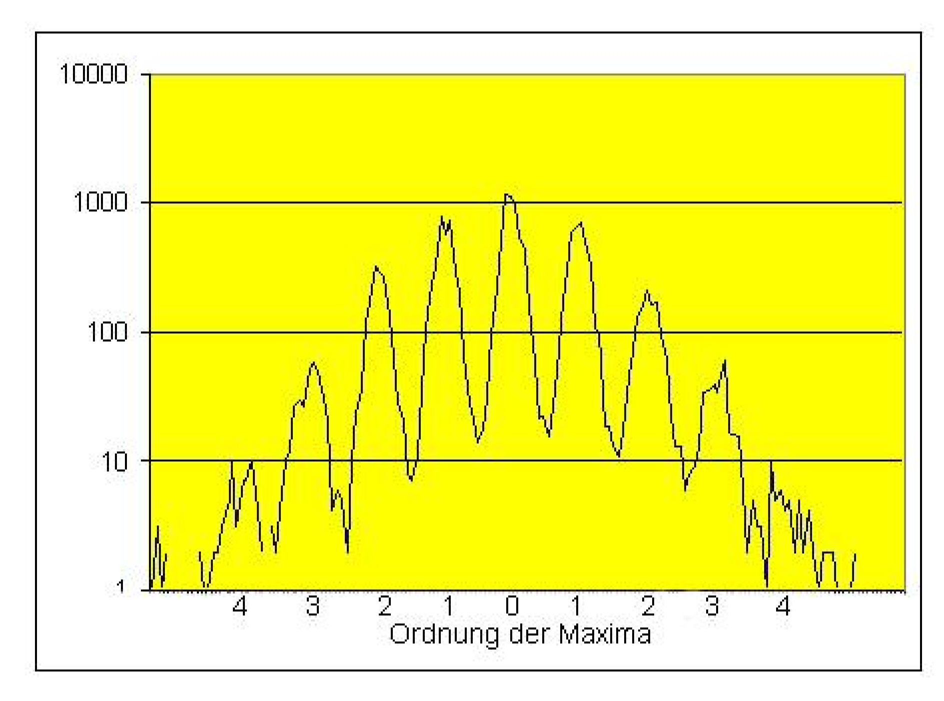


Abbildung 44: Intensitätsverteilung mit logarithmischer Skala

Der Nachweis der Einzelereignisse lässt sich mit Hilfe des Teilchencharakters erklären. Die Entstehung des Interferenzmusters ist Indikator für wellenhafte Ausbreitung. Der „Dualismus des Lichts“ zeigt sich im Aufbau des Musters aus einzelnen Punkten. Der scheinbare Widerspruch zwischen Welle und Teilchen löst sich mit Hilfe der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Das wellenhafte Verhalten der Wellenfunktion Ψ (x) und das teilchenhafte Verhalten beim Nachweis der Quantenobjekte verbinden die beiden scheinbar gegensätzlichen Züge zu einem einheitlichen Bild.

III. Einsatz der Experimente in Schule und Universität

1. Der Themenkomplex Licht im Physikunterricht der Mittel- und Oberstufe

Im Physikunterricht der Mittelstufe bildet die „traditionelle“ Physik den Rahmen des Curriculums. Die Schülerinnen und Schüler lernen die teils seit Jahrhunderten bekannten Gesetze und Regeln der Mechanik, Elektrizitäts- und Wärmelehre. In vielen Bundesländern wird im Curriculum als Einstiegsthema für den Anfangsunterricht in Physik die Optik vorgeschlagen. Die Grundlagen der Optik erlernen die Schülerinnen und Schüler ausgehend von ihren Alltagserfahrungen; Lichtquellen, Lichtstrahlen, Schatten, Farben, usw. Basis der Erklärungen ist meist das Strahlenmodell, welches in seinen Grundzügen seit der Antike bekannt ist. Ausgehend von der optischen Abbildung und der Ausbreitung des Lichts werden Themenbereiche wie Reflexion und Brechung, Linsen oder optische Instrumente gelehrt und gelernt. Am Ende der Mittelstufe sollten die Schülerinnen und Schüler „die Erscheinungen in Natur und Technik aus Sicht der Physik beobachten und angemessen beschreiben können.“ [Le99,S.18]
Die Quantenphysik bietet in der gymnasialen Oberstufe die Möglichkeit zur Überleitung von der „traditionellen“ Physik vergangener Jahrhunderte hin zur „modernen“ Physik des 20. und 21. Jahrhunderts. Es bietet sich die Gelegenheit naturphilosophische Grundfragen (z.B. „Was ist Licht?“) bewusst zu machen und gleichzeitig naturwissenschaftliche Antworten anzubieten. Die Quantenphysik nimmt im Lehrplan der Oberstufenphysik einen zentralen Platz ein. Am Beispiel des rheinland-pfälzischen Lehrplans werden Verwendungsmöglichkeiten der vorgestellten Versuche in Schule erläutert.
Der Lehrplan des Landes Rheinland-Pfalz ist nach dem Prinzip eines Baukastens strukturiert. Jeder Baustein widmet sich inhaltlich einem Teilthema. Es gibt Pflichtbausteine und Wahlpflichtbausteine, wobei Pflichtbausteine müssen behandelt werden. [Le99, S.14] Im Unterricht soll das „Methodenrepertoire“ der Physik genutzt werden, welches ausdrücklich die Verwendung der „experimentellen Überprüfung“ vorsieht. [Le99, S.9] Während für die Mittelstufenphysik die Sammlungen der Schulen Experimente meist in ausreichender Zahl und Vielfalt enthalten, ist die Anzahl quantenphysikalischer Experimente beschränkt. Dennoch

sollten vorhandene Möglichkeiten ausgenutzt werden, da reproduzierbare Experimente den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit bieten, die erlernten Aussagen der Physik zu überprüfen. Das Experiment nimmt als Bindeglied zwischen Theorie und Realität einen zentralen Platz im Physikunterricht ein. Es ermöglicht Hypothesen und Theorien zu überprüfen und Vorstellungen zu festigen. [Le99,S.10] Aufgrund der Komplexität des Themenbereiches Quantenphysik brauchen Schüler die Visualisierung im realen Experiment zum besseren Verständnis. „Anders als in den klassischen Gebieten der Physik ist der Lernende zu neuen Konstruktionen in seinem eigenen Kopf verpflichtet.“[Le00a, S.24] Die Schülerinnen und Schüler erfahren, dass sich die Phänomene der Quantenphysik häufig nicht mehr durch bekannte Konzepte vollständig und widerspruchsfrei beschreiben lassen. Neue Ansätze werden nötig.
Der Einstieg in den Themenkomplex erfolgt in Grund- und Leistungskurs mit den Bausteinen „*(Mechanische) Schwingungen*“ bzw. „*(Mechanische) Wellen*“. In diesen Bausteinen sollen formale und begriffliche Grundkenntnisse vermittelt werden. [Le 99, S. 26] Es wird neben der Entstehung und Ausbreitung von Wellen erstmals das Interferenzprinzip erklärt. Im Zusammenspiel mit dem Baustein „*Wellenoptik (1)*“ ist die Einführung des Wellenmodells des Lichts vorgesehen. In Anlehnung an die historische Entwicklung empfiehlt der Lehrplan an dieser Stelle den Einsatz des Doppelspaltexperiments im klassischen Sinne. „Ergänzend oder ersatzweise sind (...) auch andere Experimente möglich.“ [Le99, S.41] Das Doppelspaltexperiment nach Thomas Young wird in der vorliegenden Arbeit mit ergänzenden Versuchsvarianten vorgestellt (variable Spaltbreite, Polarisationsfilter, mit und ohne Linse,...)(vgl. Kapitel II.3.1.). Der Wellencharakter des Lichts kann experimentell erarbeitet werden.

Der Übergang von der klassischen Wellentheorie zur quantenmechanischen Betrachtungsweise wird experimentell durch die Reduzierung der Lichtintensität beim Doppelspaltversuch realisiert. Anhand der experimentellen Befunde wird das quantenmechanische Verhalten der Photonen am Doppelspalt erläutert. Die klassischen Erklärungsversuche sind zum Scheitern verurteilt und neue quantenphysikalische Modelle werden nötig. Eingebettet in den Pflichtbaustein „*Mikroobjekte 1*“ wird die Problematik der Begriffsbildung auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse am Doppelspaltexperiment behandelt. [Le99, S.27] Die experimentelle Ausstattung erlaubt an den meisten Schulen die Durchführung des Doppelspaltversuches mit niedriger Lichtintensität nicht. Häufig bleibt nur der Einsatz von

Simulationsprogrammen, um das Experiment mit den Schülerinnen und Schülern zu erarbeiten. Im vorgestellten „Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen“ (siehe Kapitel II.4.) kann das Verhalten der Lichtquanten am aufgebauten Realexperiment untersucht werden. Neben dem bereits bekannten Wellencharakter zeigt sich der Teilchencharakter des Lichts. Zusätzlich kann die stochastische Deutung der quantenmechanischen Vorgänge thematisiert werden. Den Schülerinnen und Schülern wird die quantenphysikalische Denkweise als Fundament naturwissenschaftlicher Bildung aufgezeigt. Der Dualismusgedanke kann thematisiert werden. [Le99, S.41]

Im Pfilchtbaustein „*Mikroobjekte 3*“ wird nach Empfehlung des Lehrplans anhand des Fotoeffekts und des Comptoneffekts der Teilchencharakter des Lichts eingeführt. Hier bietet der Versuch „Hörbarmachen von Photonen“ (siehe Kapitel II. 2.) eine Abwechslung zum üblichen experimentellen Repertoire der Schule. Zusätzlich könnte man ausgehend vom eingesetzten Photomultiplier einen Exkurs in den Bereich der Teilchenphysik und deren Großforschungsprojekte (z.B. am CERN) anschließen. Die verwendeten Laser bieten die Möglichkeit zu einem Exkurs in die Festkörperphysik. Anhand der Halbleiterlaser kann das Bändermodell eingeführt werden.

Im Wahlbaustein „*Interpretation der Quantenphysik*“ können mit den Schülerinnen und Schülern naturphilosophische Grundfragen behandelt und naturwissenschaftliche Antworten erarbeitet werden. Behandelt werden naturphilosophische Probleme und Interpretationen der Quantenphysik und deren erkenntnistheoretische Fragestellungen. Hierzu empfiehlt der Lehrplan die Probleme, die bei der quantenmechanischen Interpretation entstehen, mit Hilfe der experimentellen Ergebnisse des Doppelspaltversuchs zu thematisieren. [Le99, S.47] Der Dualismusgedanke stellt Schülerinnen und Schüler häufig vor Verständnisprobleme. Waren sie bisher gewohnt, im Physikunterricht eindeutige Regeln und Gesetze zu lernen, begegnen sie hier nun erstmals dem Fall, dass Licht Welle oder Teilchen sein kann.

Probleme entstehen bei Schülerinnen und Schülern häufig durch das Nebeneinander der widersprüchlichen klassischen Erklärungsmodelle. Diese Schwierigkeiten werden häufig durch das unreflektierte Verwenden der tradierten klassischen Fachsprache verstärkt. Beim Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen erleben die Schülerinnen und Schüler ihre quantenphysikalische „Grunderfahrung“. Gewohnte Anschauungen versagen, es treten Widersprüche auf. Der stochastische Aufbau der Interferenzbilder zeigt den Schülerinnen und Schülern,

dass allzu weitreichende Vergleiche mit klassischen Wellen und klassischen Teilchen unzulässig sind.

Dieses janusköpfige Verhalten des Lichts sollte gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern auch aus philosophischer Sicht behandelt werden. Die verschiedenen philosophischen Betrachtungsweisen können zum Beispiel anhand von Originaltexte aus den einzelnen Entwicklungsepochen erarbeiten werden (vgl. Kapitel I.).

Die Versuche können auch im Wahlbaustein „*Geschichte der Physik*" eingesetzt werden. Die historische Entwicklung der einzelnen Lichttheorien, wie sie in Kapitel 2 dargestellt wird, bietet eine hervorragende Möglichkeit den Schülerinnen und Schülern Wissenschaftshistorie näher zu bringen. Es kann auch auf die kulturhistorische Bedeutung der Physik eingegangen werden. Durch die Orientierung der Versuchsaufbauten an den historischen Experimenten (Young, Jönsson) lässt sich die geschichtliche Entwicklung der Experimentalphysik illustrieren. Ein möglicher Schwerpunkt kann die Behandlung der quantenphysikalischen Revolution darstellen. Das Doppelspaltexperiment einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Quantentheorie kann wertvolle experimentelle Unterstützung leisten. Die historischen Aspekte können aber auch problemlos in den oben erwähnten Pflichtbausteinen als ergänzende Informationen integriert werden. [Le99, S.48]

Die Experimente sind an der Universität beheimatet. Schülergruppen haben die Möglichkeit mit den Experimenten bei Besuchen an der Universität zu arbeiten. Dies ist möglich im Rahmen des PeP-Projekts[82] oder bei individuell organisierten Besuchen von Physikkursen. Weitere Möglichkeiten ergeben sich unter Umständen durch das gerade im Aufbau befindliche Programm „Nat-Schülerlabor"[83]. Neben diesen Möglichkeiten in der Universität, können Schulen die Versuche für den Einsatz vor Ort beim Institut für Physik ausleihen. Für diesen Einsatzzweck befindet sich im Anhang dieser Arbeit eine ausführliche Betriebsanleitung.

Für Schulen, denen es nicht möglich ist mit den Realexperimenten zu arbeiten, wurde eine Videopräsentation erstellt.[84] Die Präsentation zeigt mehrere Videosequenzen, die mit WinSIS am Realexperiment aufgenommen wurden. Zu sehen sind Abfolgen von Einzelbildern, wie sie

---

[82] PeP: **P**hysik **e**rfahren im Forschungs-**P**raktikum;
Weitere Informationen unter http://larissa.physik.uni-mainz.de/pep/

[83] Programm für Schülerinnen und Schüler der naturwissenschaftlichen Fachbereiche der Universität Mainz
Weitere Informationen unter http://www.nat-schuelerlabor.de/

[84] Download der Präsentation unter: www.physik.uni-mainz.de/lehramt

im Realexperiment im Livebild zu sehen sind, sowie eine Akkumulationssequenz mehrerer Einzelbilder. Kurze Begleittexte erläutern die Videos. Die Videosequenzen könne in Echtzeit oder Zeitlupe abgespielt werden. Auch Einzelbildvorlauf ist möglich. Die Präsentation wurde mit dem Video-Mess und Präsentationssystem „ViMPS“ [85] erstellt. „ViMPS“ ermöglicht auch das Abspielen der Präsentation. Die Präsentation und das Programm „ViMPS“ können auf den Internetseiten der Universität Mainz[86] herunter geladen werden. Diese Präsentation kann im Unterricht eingesetzt werden, um mit Hilfe der Originalvideos den Schülerinnen und Schülern die Versuche näher zu bringen.

2. Einsatz an der Universität

Die Versuche werden im Lehrbetrieb an der Universität im gesamten Bereich der Experimentalphysik eingesetzt. An geeigneter Stelle, meist bei der Behandlung des Dualismus des Lichts, werden die Experimente in den Physik-Vorlesungen des Grundstudiums eingesetzt. Die Versuchsaufbauten bieten hier die Möglichkeit eines Realexperiments an einer Stelle, an der bislang häufig auf Filme oder Computersimulationen zurückgegriffen werden musste. Die Versuche sind in der Sammlung des Lehramtspraktikums untergebracht. Im Rahmen der Lehramtskandidatenausbildung werden sie im Demonstrationspraktikum eingesetzt. Der Einsatz erfolgt in den Bereichen „Optik“ und „Wellenoptik“. Auch die Verwendung in den Fachdidaktik-Seminaren ist denkbar.

Zusätzlich werden die Versuche in der Öffentlichkeitsarbeit der Universität und des Instituts eingesetzt. Präsentiert wurden die Versuche unter anderem im Rahmen von Laborführungen beim „Tag der offenen Tür“, bei der Posterausstellung während des „Institutstreffs“ des Instituts für Physik sowie bei der „Betreuten Informationsveranstaltung für Schülerinnen und Schüler“ (BISS). Ferner ist eine Präsentation am Stand des Fachbereichs Physik beim „Wissenschaftsmarkts der Universität Mainz 2003“ in der Mainzer Innenstadt vorgesehen.

Außerhalb der Universität wurden die Experimente beim 289. WE-Heraeus-Seminar „Naturphänomene für den Physikunterricht aus fachdidaktischer und fachwissenschaftlicher Sicht“ im Rahmen einer Posterausstellung präsentiert.

---

[85] ViMPS wurde an der Universität Mainz im Rahmen einer Staatsexamensarbeit entwickelt und ist im Internet frei erhältlich. Weitere Informationen sowie das Programm selbst erhalten sie unter: www.physik.uni-mainz.de/lehramt/Vimps

[86] www.physik.uni-mainz.de/lehramt

IV. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden drei Demonstrationsexperimente zum Dualismus des Lichts aufgebaut. Die Versuche zeigen verschiedene Facetten der Natur des Lichts auf. Je nach experimenteller Anordnung zeigt das eingesetzte Laserlicht Wellen- oder Teilchencharakter. Ein Photomultiplier, eine Steuerelektronik und zwei Lautsprecher ermöglichen das Hörbarmachen von Photonen. Nur wenige Photonen des durch Filter abgeschwächten Laserstrahls erreichen den Photomultiplier. Die Elektronik wandelt die am Multiplier detektierten Signale in vom Lautsprecher verwertbare Audio-Signale um. Jedes Knacken des Lautsprechers steht für ein ankommendes Photon. Der Teilchencharakter des Lichts zeigt sich. Wird das gleiche Laserlicht an verschiedenen Spalten gebeugt, werden Interferenzstrukturen auf dem dahinter liegenden Schirm deutlich. Diese sind Merkmal der Wellennatur des Lichts. Der Einsatz eines verstellbaren Doppelspalts und zusätzlicher Polarisationsfolien ermöglicht beim aufgebauten Versuch eine Vielzahl von Variationen des bekannten Doppelspaltexperiments. Der Dualismuscharakter des Lichts zeigt sich im Hauptversuch dieser Arbeit. Das Doppelspaltexperiment wird mit einzelnen Photonen eines stark abgeschwächten Laserstrahls durchgeführt. Eine CCD-Kamera mit vorgeschaltetem Bildverstärker übernimmt die Rolle des menschlichen Auges. Jeder einzelne Photonentreffer offenbart den Teilchencharakter des Lichts. Die scheinbar willkürlich verteilten Treffer können mit Hilfe der eingesetzten Kamerasoftware aufaddiert werden. Nach ausreichender Summationszeit wird das bekannte Interferenzmuster der Beugung am Doppelspalt erkennbar. Der Wellencharakter des Lichts zeigt sich. Die verschieden Charaktere werden also in einem Experiment gleichzeitig deutlich. Die Versuche wurden für den Einsatz in Schule und Hochschule entwickelt. Sie ermöglichen die experimentelle Erarbeitung wichtiger quantenphysikalischer Aspekte.

Anhang:

1. Bedienungsanleitung

1.1. Allgemeine Hinweise

Abbildung 45: Tisch 1(links) und Tisch 2 (rechts) in der Gesamtansicht[87]

Die drei vorgestellten Versuche sind auf zwei Versuchstischen aufgebaut (Abb.45). Diese sind auf Rollen gelagert und können durch Feststellbremsen gegen unbeabsichtigtes Verschieben gesichert werden. Alle zum Verständnis des Versuchs wichtigen Bauteile sind auf der Oberseite der Tische montiert. Alle anderen Bauteile wie zum Beispiel die Spannungsversorgung sind in den Schränken unterhalb der Tische untergebracht. Der Zugang zum Innenleben der Tische erfolgt über zwei Türen an der Längsseite. Die Bedienung erfolgt über Steuerelemente, die an der Querseite der Tische auf Frontplatten untergebracht. Während des Experimentierens ist kein Zugriff auf das Innere der Tische notwendig. „Der klassische Doppelspaltversuch“ und „Das Hörbarmachen der einzelnen Photonen“ sind gemeinsam auf einem Tisch montiert. Dieser wird im Folgenden als Tisch 1 bezeichnet und ist auch entsprechend gekennzeichnet. Der „Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen“ wurde auf Tisch 2 allein stehend aufgebaut.

---

[87] Bildquelle: eigenes Foto

Die Spannungsversorgung

Die Versuche benötigen als Stromversorgung 230 V Wechselstrom aus dem Hausstromnetz. Die Versorgung wird über Kaltgerätekabel hergestellt, welche an den entsprechenden Buchsen der Frontplatten angeschlossen werden. Die Kaltgerätesteckerbuchse ist in Abbildung 49 bzw. 51 neben dem Hauptschalter zu erkennen. Die Buchse ist durch eine Sicherung abgesichert. Bei Tisch 1 ist eine 100mA/250 V Sicherung eingebaut, bei Tisch 2 eine 2A/250 V Sicherung. Das Sicherungsfach befindet sich direkt unterhalb der Buchse. (Beschriftung: „Use only with a 250 V fuse“)

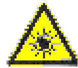
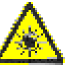
Beide Tische verfügen über einen Hauptschalter. Bei eingeschaltetem Hauptschalter brennt die Kontrollleuchte im Schalter und die Spannungsversorgung für alle zu den Versuchen gehörenden Bauteilen ist hergestellt. Dazu gehören auch die Schukosteckdosen, die sich im Inneren der Tische befinden. Bei Tisch 1 ist dies eine Einfachsteckdose, welche zur Spannungsversorgung der PC-Lautsprecher verwendet wird. In Tisch 2 ist eine Dreifachsteckdose eingebaut. Hier sind das Anschlusskabel für den Computer und das Steckernetzteil des Bildverstärkers eingesteckt. Die dritte Dose bleibt ungenutzt. Sie sollte nicht zur 230 V Versorgung weiterer elektrischer Geräte verwendet, da die eingebauten Schutzsicherungen der Kaltgerätesteckerbuchsen größenmäßig nicht darauf ausgelegt sind.

Ferner wird bei eingeschaltetem Hauptschalter die Spannungsversorgung für die in den Kästchen hinter den Frontplatten befindlichen Netzteile, die die 230 V Wechselspannung auf die benötigte Gleichspannung herunter transformieren, hergestellt.

Bei Tisch 1 ist ein +12V/GND/ -12V Netzteil eingebaut. Es liefert die Spannungsversorgung der Elektronik-Platine, die das Photomultiplier-Signal in vom Lautsprecher verwertbare Signale umwandelt. Auf der Platine ist auch die +5V Spannungsversorgung für die Laser untergebracht. Tisch 2 verfügt über ein +5V/GND Netzteil, das die Laserversorgungsspannung direkt liefert. Daher sind bei eingeschaltetem Hauptschalter automatisch auch die Laser in Betrieb.

Die Lasermodule

Als Lichtquellen sind Lasermodule eingebaut. Bitte beachten sie die einschlägigen DIN-Normen[88] und Unfallverhütungsvorschriften[89] zum Betrieb eines Lasers. Konsultieren Sie in Zweifelsfällen vor Inbetriebnahme den zuständigen Laserschutzbeauftragten. Die verwendeten Laserdioden sind in der Laserklasse 2 eingestuft. Das von Lasern dieser Klasse emittierte Licht verursacht keine Schädigung des Auges, wenn die direkte Bestrahlung nicht länger als 0,25 Sekunden dauert. Diese Zeit ist für den so genannten Lidschlussreflex nötig, welcher das Auge vor weiterer Bestrahlung schützt. Allerdings sollte aus Sicherheitsgründen ein direkter Blick in einen Laser der Klasse 2 vermieden werden. Die Laserstrahlung dringt sehr gut bis zur Netzhaut durch, wo sie zu einem kleinen Fleck fokussiert wird und dadurch photochemische und thermische Schädigungen hervorrufen kann. Netzhautverbrennungen können die Folge sein.[90] Deshalb gilt stets:

 NICHT in den Strahl blicken! 

Die Ausgangsleistung der Lasermodule kann mit den 10 kΩ -Potentiometern zwischen 0 und 1 mW reguliert werden. Die Potentiometer sind auf den Frontplatten angebracht.

---

[88] unter anderem: DIN EN 60825-1
[89] UVV „Laserstrahlung“ (BGV B2/VBG 93)
[90] [Yo97, S.247f.]

1.2. Tisch 1:

1.2.1. Variationen des klassisches Doppelspaltexperiments

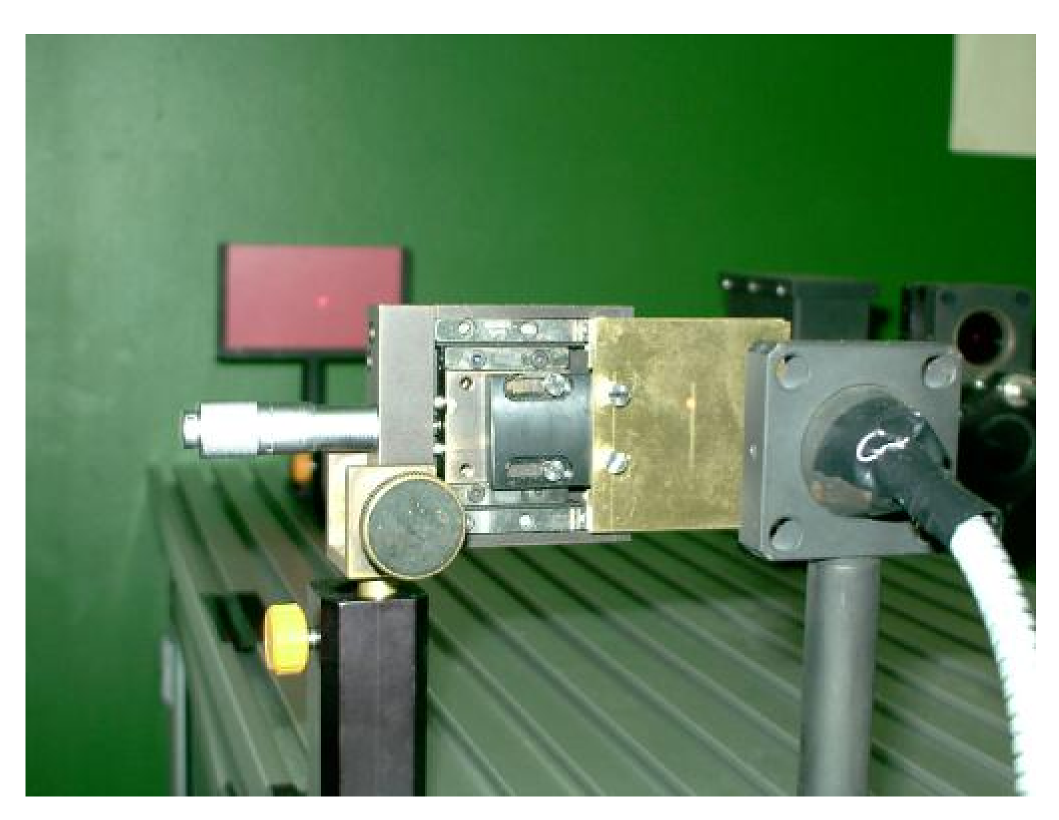


Abbildung 46: Doppelspaltversuch mit verstellbarem Doppelspalt[91]

Das Potentiometer „Laser 1“ steuert die Leistung des Lasermoduls für den Doppelspaltversuch. Der Nullanschlag der Potentiometer befindet sich rechts unten. Der Drehsinn von null zum Maximum ist gegen den Uhrzeigersinn (Abb.49).

Bei diesem Versuchsaufbau (Abb.46) sind zwei identische Doppelspalte (Spaltbreite 0,2 mm; Spaltabstand 0,25 mm) im Abstand von 2 mm eingebaut. Der vom Laser aus gesehen hintere Doppelspalt ist fest eingebaut. Der vordere Doppelspalt kann mittels einer Mikrometerschraube horizontal senkrecht zur optischen Achse verstellt werden. Dadurch können verschiedene Spaltbreiten zwischen 0 mm und 0,2 mm eingestellt werden. Der Spaltabstand ändert sich analog zur eingestellten Spaltbreite. Bei der Mikrometerschraubeneinstellung 12,0 sind die beiden Doppelspalte deckungsgleich. Auch die Einstellung eines Einzelspaltes ist möglich (13,4).

---

[91] Bildquelle: eigenes Foto

Das jeweilige Interferenzmuster ist auf dem roten Schirm am Ende des Strahlengangs sichtbar. Zur Demonstration des Simultankontrasts (vgl. Kap.II.3.) kann der rote Schirm durch weißes Papier abgedeckt werden. Um die Struktur des Musters deutlicher zu machen, kann des Weiteren eine Linse zwischen Doppelspalt und Schirm eingesetzt werden. Die erforderliche Halterung ist bereits eingebaut und kann nach Lösen der Inbusschrauben auch längs der optischen Achse verschoben werden.

Im unteren Teil des Doppelspalts sind vor den Spalten Polarisationsfolien angebracht. Das Laserlicht wird durch die Filter polarisiert. Es ist dann kein Interferenzmuster auf dem Schirm erkennbar. (siehe auch Kap.II.3.)

1.2.2. Hörbarmachen von Photonen

Abbildung 47: Hörbarmachen von Photonen[92]

Bei Tisch 1 wird neben der Stromversorgung der Laser auch die Versorgung des Photomultipliers, der Photomultipliersteuerelektronik und der Lautsprecher durch den Hauptschalter geschaltet. Das Potentiometer „Laser 2“ steuert den Laser dieses Versuchs. Der Nullanschlag des Potentiometers befindet sich rechts unten. Der Drehsinn von null zum Maximum ist gegen den Uhrzeigersinn (Abb.49).

Zu Beginn des Versuchsbetriebs ist die exakte Position des Laserstrahls zu kontrollieren. Es ist darauf zu achten, dass der Laserstrahl das Eingangsfenster des Photomultipliers exakt trifft. Dies ist in der Regel der Fall. Es kann aber durch Transporterschütterungen zu Abweichungen kommen, die zu korrigieren sind. Während dieser Justage des Versuchs ist es empfehlenswert den Laser bei voller Leistung zu betreiben.

---

[92] Bildquelle: eigenes Foto

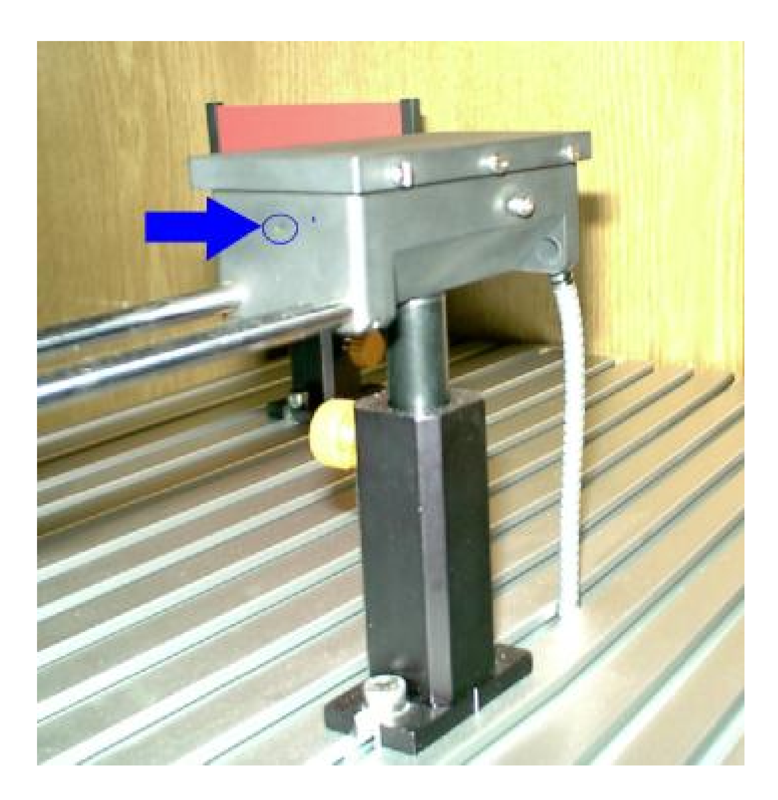


Abbildung 48: Photomultiplierbox mit markiertem Eingangsfenster[93]

Der lichtempfindliche Photomultiplier ist zur Streulichtabschirmung in einen Kasten eingebaut. Er sollte nicht bei Temperaturen unter +5°C betrieben werden. Das Eingangsfenster (Blauer Kreis in Abb. 48) ist mit einem Graufilter sowie einem Bandpassfilter geschützt. Trotz dieses Schutzes sollte eine Bestrahlung des Eingangsfensters mit voller Laserleistung (d.h. ohne zusätzliche Graufilter) vermieden werden. Diese könnte zu einer Zerstörung des Photomultipliers führen. Im regulären Versuchsaufbau wird der Laser durch die weiteren Graufilter im Strahlengang ausreichend abgeschwächt. Das normale Tageslicht und Raumbeleuchtungen sind aufgrund der direkt vorgeschalteten Kombination aus Grau- und Bandpassfilter für den Photomultiplier ungefährlich. Eine direkte Sonnenbestrahlung sollte vermieden werden.

Allerdings muss die Sensitivität des Photomultipliers mit Hilfe der Kontrollspannung (V control) den jeweiligen Lichtverhältnissen angepasst werden. Während dieser Anpassung muss der Laser bereits auf das Eingangsfenster justiert sein und bei voller Leistung laufen. Ferner kann an den Bananenbuchsen (schwarz & gelb) ein Voltmeter bzw. Multimeter angeschlossen werden. Abgegriffen wird hier die Kontrollspannung des Photomultipliers. Der Messbereich ist zwischen 0 V und 1 V einzustellen. Die Spannung kann mit Hilfe des dane-

---

[93] Bildquelle: eigenes Foto

benliegenden Potentiometers „PM Steuerung“ reguliert werden. Die Sensitivität des Photomultipliers ist richtig eingestellt, wenn zeitlich deutlich getrennte audio-Signale zu hören sind. Falls nur ein permanentes Rauschen zu hören ist, befindet sich der Photomultiplier in Sättigung. Bei normalen Lichtverhältnissen liegt der optimale Wert für V control zwischen 0,4 V und 0,5 V.

Abbildung 49: Frontplatte Tisch 1[94]

Mit Hilfe des Potentiometers „Laser 2“ kann die Laserleistung variiert werden und dadurch ebenfalls das Knacken beeinflusst werden. Zusätzlich ist zwischen Laser und den Graufiltern ein Shutter eingebaut, der in den Strahlengang des Lasers geklappt werden kann. Bei Unterbrechung des Laserstrahls wird auch das akustische Signal unterbrochen.

Die Lautsprecher benötigen 230 V Netzspannung, die ebenfalls bei eingeschaltetem Hauptschalter geliefert wird. Die Netzspannung wird intern in 12 V Gleichspannung transformiert. Die Lautsprecher verfügen über einen zusätzlichen Ein/Ausschalter (Power) sowie über einen

[94] Bildquelle: eigenes Foto

Lautstärkeregler (Volume) und Höhenregler (Tone). In eingeschaltetem Zustand leuchtet eine grüne LED am Lautsprecher unterhalb der Frontplatte.

Das Audiosignal wird über eine Klinkenbuchse (grüner Stecker) an der Rückseite des Elektronikkastens hinter der Frontplatte abgegriffen.

1.3. Tisch 2: Der Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen

1.3.1. Versuchsablauf

Abbildung 50: Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen[95]

Der Hauptschalter des zweiten Versuchstisches steuert die Stromversorgung aller eingesetzten Geräte. Neben dem Laser sind dies der Computer, sowie der Bildverstärker. Die benötigte Spannung für den Bildverstärker wird durch ein Steckernetzteil (12V/500mA) zur Verfügung gestellt. Der Bildverstärker ist automatisch mit Einschalten des Hauptschalters in Betrieb. Aufgrund der hohen Sensitivität des Bildverstärkers darf dieser in eingeschaltetem Zustand nicht intensivem Licht ausgesetzt werden. Deshalb ist *vor* dem Einschalten unbedingt darauf zu achten, dass die Filter stets korrekt auf das Objektiv vor dem Bildverstärker aufgeschraubt sind. Der Betrieb des Bildverstärkers ohne vorgeschaltete Schutzfilter kann zu Schäden am Bildverstärker führen. Ferner sollten die Anschlusskabel zum Bildverstärker nicht getrennt werden. Sollte dies doch einmal geschehen sein, ist bei der Wiederherstellung der Verbindung unbedingt auf die korrekte Polarität zu achten. Ein falsches Anschließen der Spannungsversorgung führt zur Zerstörung des Bildverstärkers.

---

[95] Bildquelle: eigenes Foto

Ebenso ist der Laser bei eingeschaltetem Hauptschalter automatisch in Betrieb. Seine Leistung kann mit dem Potentiometer, beschriftet mit „Laser“, gesteuert werden. (siehe Abb. 55 unten rechts) Der Nullanschlag befindet sich links unten. Der Drehsinn von Null bis zur maximalen Leistung ist mit dem Uhrzeigersinn (Abb.51).

Abbildung 51: Frontplatte Tisch 2[96]

Vor Hochfahren des Computers sind die Maus und die Tastatur an den entsprechenden Buchsen der Frontplatte anzuschließen. An der Sub-D-Buchse „Monitor/Beamer“ kann wahlweise ein Computerbildschirm oder ein Beamer angeschlossen werden. Bei Anschluss eines Bildschirms ist eine Größe von 17 Zoll oder größer ratsam. Bitte den Monitor/Beamer nicht an der Mehrfachsteckdose des Versuchs anschließen, da die an der Frontplatte eingebauten Sicherungen nicht für diese zusätzliche Belastung ausgelegt sind.

Der Computer hat an seiner Rückseite unterhalb der Kaltgerätesteckerbuchse einen schwarzen (0/1)-Schalter. Dieser muss in der Stellung 1 stehen. Dies ist im Normalbetrieb der Fall. Bei jedem Hochfahren muss aber der Rechner durch Drücken des rot markierten Druckknopfs an seiner Vorderseite gestartet werden. Nach dem Hochfahren des Computers wer-

---

[96] Bildquelle :eigenes Foto

den automatisch die Programme „Iserfire“ und „WinSIS“ gestartet. WinSIS, ein „Scientic Imaging System“ der Firma Theta System Gröbenzell dient als Steuerprogramm und Visualisierungsprogramm für die CCD-Kamera.

1.3.2. Bedienung WinSIS

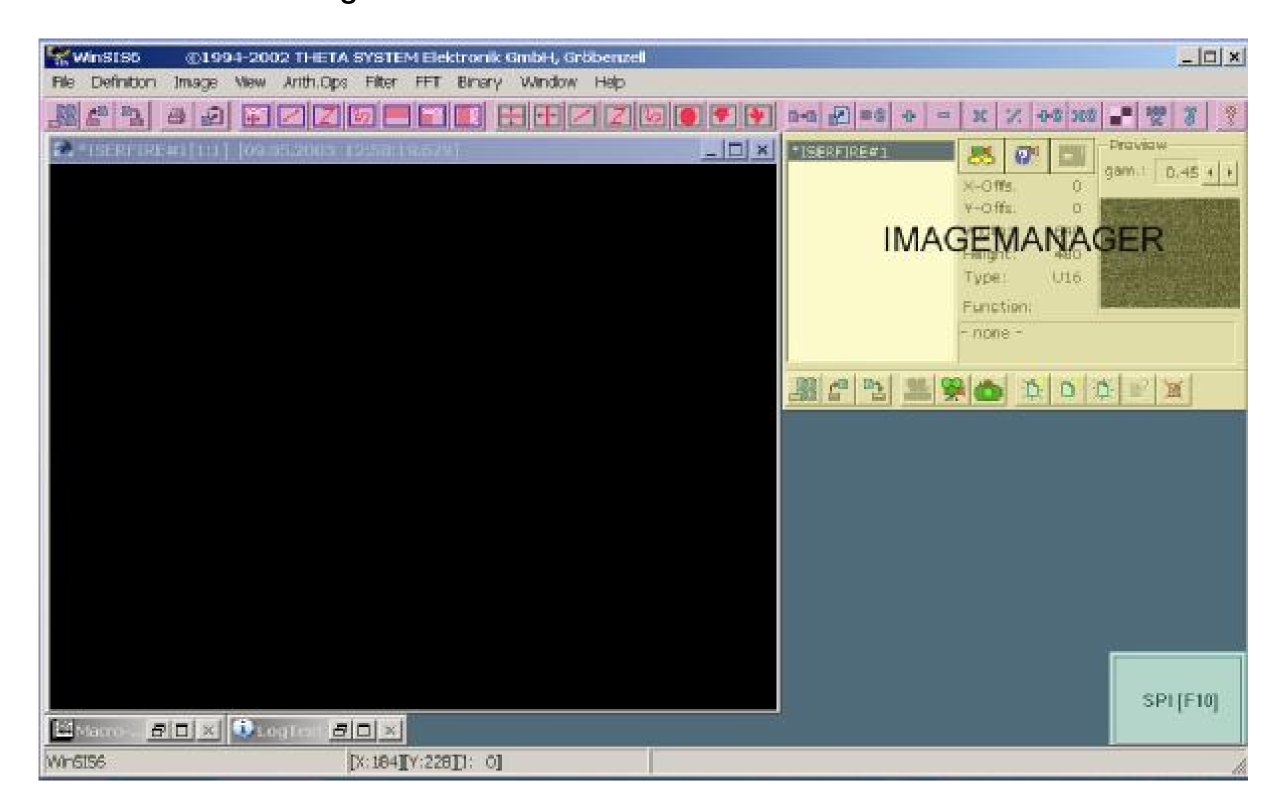


Abbildung 52: WinSIS-Desktop

Der Startbildschirm von WinSIS (Abb.52) zeigt am oberen Rand die Menu-Leiste und eine Reihe mit System Buttons, die die wichtigsten Befehle verlinkt haben (Abb.52, rot unterlegt). Das Programm WinSIS bietet eine Fülle von Applikationen. Im Folgenden werden nur die für das vorgestellte Experiment verwendeten Anwendungen erläutert. Für alle weiteren Optionen, die das Programm bietet, verweise ich auf die WinSIS-Online Hilfe, die mit der Taste „F1“ oder dem Button „?“ direkt geöffnet werden kann.

In der rechten oberen Ecke des WinSIS-Desktops wird automatisch der „Image Manager“ geöffnet. Mit dem Image Manager (Abb. 52, gelb unterlegt & Abb. 53) werden die Bilddateien verwaltet. Mit Starten des Programms wird automatisch die Bilddatei *ISERFIRE#1 angelegt. Gleichzeitig wird das Fenster zur Bilddarstellung der ISERFIRE Datei geöffnet. (Abb. 52, blau unterlegt) In die Datei *ISERFIRE#1 werden alle vom Image Server ISERFIRE gelieferten Bild-

daten geschrieben. Aus dieser Datei werden die Bilddaten für die verschiedenen Anwendungen in WinSIS akquiriert.

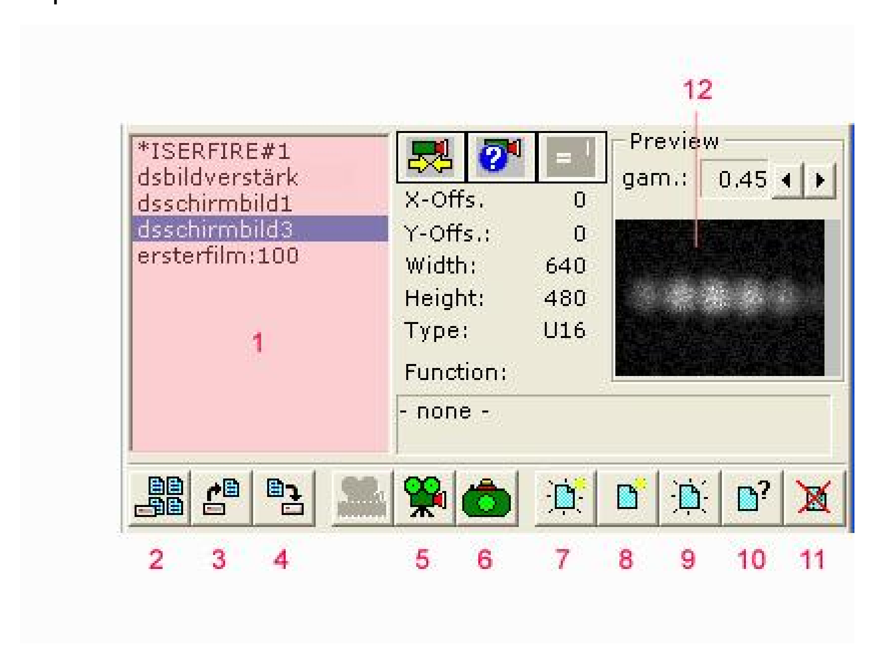


Abbildung 53: WinSIS ImageManager

Neben *ISERFIRE#1 können weitere Bildspeicherdateien generiert werden. Die neuen Bildspeicher werden im Image Manager unter der bereits vorhandenen Datei *ISERFIRE#1 aufgelistet. (Abb.53, Nr.1, rot unterlegt) Es kann zwischen zwei verschiedenen Arten der Generierung gewählt werden. Durch den Smart Icon „Neues Bild generieren“ (Abb.53, Nr.8) wird ein Dialogfenster (Abb.54) geöffnet, in dem die verschiedenen Bildeigenschaften eingestellt werden können.

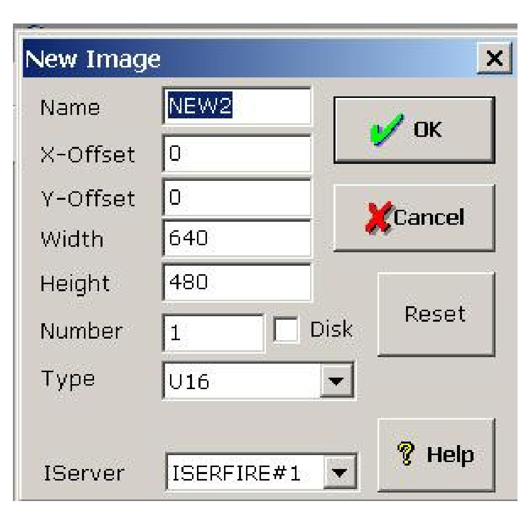


Abbildung 54: Dialogfenster „New Image“

Der Name der Datei kann beliebig gewählt werden. Wird kein Name gewählt wird die neue Datei mit NEW 1 bezeichnet, jede weitere Datei mit der entsprechenden fortlaufenden Num-

mer (NEW 2, usw.). Die Größe der Bilddatei wird durch Höhe und Weite definiert, ein Offset in horizontaler und vertikaler Richtung kann ebenfalls eingestellt werden. Die vom Programm voreingestellten Werte sind für den Versuch geeignet und brauchen nicht modifiziert zu werden. „Number“ bezeichnet die Anzahl der anzulegenden Speicherbereiche. Bei Zahlen größer als 1 werden Sequenzen in der Länge des jeweiligen „Number“ Werts erstellt. Es kann ferner zwischen verschiedenen Datentypen gewählt werden. Wichtig für die vorgestellte Versuchsanordnung sind die Typen „U16“ und „U32“. Dies sind 16- bzw. 32-Bit-Integer Dateien. Unter „IServer“ wird der Image-Server angegeben, aus dem die Bilddaten akquiriert werden. Hier ist ISERFIRE#1 voreingestellt. Auch diese Einstellung wird beibehalten.

Durch Anklicken des Bildspeichers in der Liste erscheinen im Image Manager ebenfalls die zugehörigen Dateiinformationen sowie ein Vorschaubild. Durch einen Doppelklick in der Bildspeicherliste wird das Fenster für die Bilddarstellung der Datei geöffnet. Alternativ kann auch der Smart Icon „Bild darstellen“ (Abb.53; Nr.9) verwendet werden.

Bei Verwendung des Smart Icons „Neues Bild generieren und darstellen“ (Abb.53, Nr.7) wird sofort das Fenster für die Bilddarstellung geöffnet. Allerdings wird nicht das Dialogfenster zum Einstellen der Bilddaten angeboten. Zur Generierung werden die Bilddaten der zuletzt generierten Bilddatei herangezogen. Zur späteren Änderung der Bilddaten muss man den Smart Icon „Bild-Definition ändern“ (Abb.53, Nr.10) verwenden. Hier wird das bekannte Dialogfenster (Abb.54) geöffnet.

Beim Öffnen eines Fensters für die Bilddarstellung erscheint neben dem Darstellungsfenster die Image Options Box. (Abb.55a) Mit Hilfe der Image Options Box kann die Art der Bilddarstellung verändert werden. Die Einstellungen betreffen allerdings stets nur die aktuelle Darstellung, die eigentlichen Bilddaten bleiben unverändert. Diese können nur im Image Manager verändert werden.

In der Image Options Box finden sich Buttons zum Verkleinern und Vergrößern des Bildausschnitts. Mit dem 1:1 Button kann der Ursprungszustand wieder hergestellt werden. Ferner kann ein selbst definierter Bildausschnitt gewählt werden (Abb.55a, blau unterlegt). Zur Orientierung werden in der unteren Statuszeile des WinSIS Desktops die x- und y-Koordinaten der jeweiligen Cursorposition angegeben. Zusätzlich zu den Ortskoordinaten wird der aktuelle Intensitätswert für dieses Pixel angegeben.

Mit dem Video-Kamera-Button kann eine Live-Aufnahme gestartet werden (Abb.55a, rot unterlegt). Die Kameradaten werden permanent in die geöffnete Bilddatei geschrieben, wobei die Vorgängerbilder überschrieben werden. Das Bild ist live im Darstellungsfenster zu sehen. Ferner öffnet sich ein Informationsfenster (Abb.55b), in dem die Datei, in die gerade geschrieben wird (Acqu.-Image) angezeigt wird. Falls diese Einstellungen gewählt wurden, werden die Sub.- und Accu.-Images ebenfalls genannt. Die Anzahl der aufgenommenen Einzelbilder wird unter Image Count angezeigt. Die Dauer der Aufnahme wird unter Elapsed Time angezeigt. Datum und Uhrzeit werden auch nach Start der Aufnahme in der Kopfzeile des Fensters angezeigt. Mit der ESC-Taste kann die Live-Aufnahme gestoppt werden.

Abbildung 55 a: Image Options Box (links); 55 b: Informationsfenster (rechts)

Mit dem Foto-Kamera-Button kann die Live-Aufnahme ebenfalls gestoppt werden. Zusätzlich kann mit diesem Button ein „Schnappschuss“ aufgenommen werden. Diese Momentaufnahme kann im SIS-Format abgespeichert werden. Der entsprechende Button findet sich im Image Manager (Abb.53, Nr.4). Das SIS-Format ist in WinSIS das Standardbildformat. WinSIS bietet zusätzlich die Möglichkeit Bilder in den bekannten Formaten TIFF, BMP und JPEG, sowie ASCII zu speichern.

Mit den oberen drei Bedienfeldern können der Kontrast und die Helligkeit der Bilddarstellung variiert werden. Im vorgestellten Versuch sind die voreingestellten Werte des Programms akzeptabel. Veränderungen brauchen hier nicht vorgenommen zu werden.

Mit der Slice-Einstellung wird die Bit-Ebenen-Darstellung aktiviert. Hierbei wird ein Pixel durch eine Gruppe von acht aufeinander folgenden Bits im 16- oder 32-Bit Wort dargestellt.

Die Bitebene kann im Bereich zwischen -7 bis 31 eingestellt werden. Der eingestellte Wert ist der Faktor um den die Bild-Pixel nach links (negativ) oder nach rechts (positiv) verschoben werden. Dargestellt werden die nächsten 8 Bit nach dem Verschieben. Bei der Einstellung Slice 4, die der Voreinstellung des Programms entspricht, werden zum Beispiel die Bits (4..11) dargestellt.

Alternativ zur Bit-Ebenen-Darstellung kann eine linear skalierte Darstellung gewählt werden. Der gewählte Intensitätsbereich wird auf 256 Stufen linear skaliert und dargestellt. Folgende Einstellungen für den Intensitätsbereich sind wählbar: Von 0 bis zur maximalen Intensität im Bild (Max); von der minimalen bis zur maximalen Intensität im Bild (MinMax); oder innerhalb eines individuell definierten Bereiches (Range). Intensitäten unterhalb der unteren Grenze werden auf 0 gesetzt, Intensitäten oberhalb der oberen Grenzen werden auf 255 gesetzt.

Das Bild wird gemäß der Programmvoreinstellung zuerst in einer Graustufenskala dargestellt. Die Verteilung der Skala ist in der ImageOptionsBox in einem Streifen am rechten Rand illustriert. Durch Anklicken dieses Streifens öffnet sich das Fenster „Load Palette..“. Hier kann aus zehn verschiedenen Farbpaletten die gewünschte gewählt werden. Bewährt hat sich die Darstellung mit der „RBGV.LUT“ Skala, welche im Wesentlichen das Lichtspektrum von rot bis violett darstellt. Nach Anklicken eines Palettennamens erscheint am unteren Rand des Fensters eine Vorschau der Farbverteilung der Palette. Mit dem „Öffnen“ Button wird die Palette geladen. Anschließend muss das „Load Palette..“ Fenster mit „Abbrechen“ wieder geschlossen werden. Die Darstellung des Bildes erfolgt nun farbig. Je nach Anzahl der Photonentreffer auf einem Pixel verschiebt sich die Farbe auf der Skala von oben (wenige Treffer) nach unten (viele Treffer).

Das Programm bietet die Möglichkeit sich ein Intensitätsprofil einer zuvor ausgewählten ROI (Region of Interest) anzeigen zu lassen. Die ROI ist üblicherweise eine Zeile oder Spalte. Frei definierte Geraden oder Polygonzüge sind aber ebenfalls möglich. Im Dialogfenster neben dem Intensitätsprofil lassen sich die obere und untere Grenze der anzuzeigenden Intensitäten einstellen. Ferner lässt sich der angezeigte Abschnitt verändern. Neben der Darstellungsart des Intensitätsprofils sind auch die Farben der Profile und des Hintergrundes wählbar.

1.3.3. Einstellung und Justage der Kamera

Zu Beginn der eigentlichen Versuchsdurchführung sollte die Justage der Kamera überprüft werden. Nur dann kann ein Abbild des Interferenzmusters visualisiert werden.

Folgende Schritte sind dabei zu beachten:

- Starten einer Live-Aufnahme im Darstellungsfenster der *ISERFIRE#1 Datei:

  Das Bild erscheint in einer Graustufendarstellung. Zur leichteren Justage empfiehlt sich das Einstellen einer Farbpalette (vgl. vorheriges Kapitel).

- Lokalisierung des Interferenzmusters:

  Der Bereich des Interferenzmusters kann - wenn gewünscht - vergrößert dargestellt werden. Wenn das Interferenzmuster in der Bilddarstellung zu sehen ist, bedarf es keiner weiteren Justage erforderlich. Die Objektive der Kamera sind fest justiert. Ein Nachstellen der Schärfe ist nicht nötig.

- Problembehebung

  Kein Bild: Ist keinerlei Bild vorhanden überprüfen Sie bitte, ob die Kamera funktionsfähig ist, insbesondere ob die Spannungsversorgung des Bildverstärkers eingeschaltet ist. (Kontrolle der Stecker). Ferner kontrollieren sie den Anschluss der Kamera an dem PC. (Firewire-Kabel).

  Kein Interferenzmuster: Falls ein Bild vorhanden ist, aber kein Interferenzmuster erkennbar ist, empfiehlt es sich wie folgt vorzugehen:

  - Entfernen des Doppelspalts
  - Einstellung des Laserstrahls auf das Objektiv:

    Der ungebeugte Laserstrahl erscheint als runder sehr intensiver Punkt im Darstellungsfenster; Justage des Punktes in etwa auf die Mitte des Darstellungsfensters;

  - Wiedereinbau des Doppelspaltes in den Strahlengang.

    Das gewünschte Muster erscheint an der Position des Punktes, falls der Doppelspalt korrekt eingebaut wurde. Mit dem Experimentieren kann begonnen werden.

1.3.4. Single Photon Imaging

Das Programm WinSIS bietet die Möglichkeit einzelne Photonen zu detektieren. Hierzu bietet WinSIS das Makro „Single Photon Imaging“. In der unteren rechten Ecke des WinSIS-Desktops findet sich ein Button um das Dialogfenster des „Single Photon Imaging“ (SPI) zu öffnen (Abb.53, grün unterlegt). Durch Doppelklick oder durch die Taste F10 öffnet sich das Dialogfenster (Abb.56).

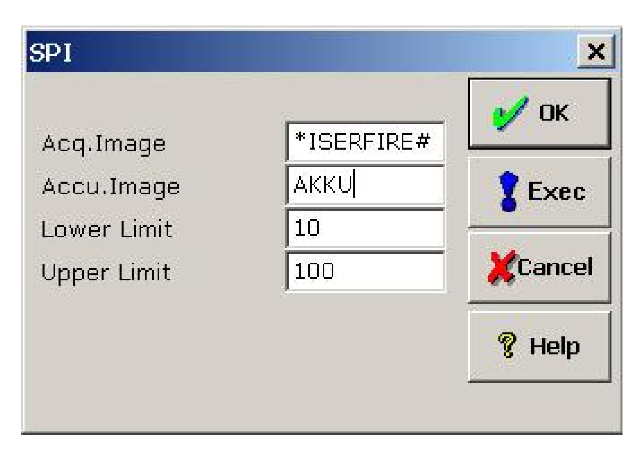


Abbildung 56: Single Photon Image Dialogfenster

Eine Akquirierungs-Bilddatei muss angegeben werden. In der Regel ist dies *ISERFIRE#1. Bei Accu.Image wird die Bilddatei angegeben, in die die Akkumulation der Daten erfolgen soll. Ferner kann ein Lower und ein Upper Limit eingestellt werden. Diese Grenzen müssen für jeden Versuchsdurchlauf unter Berücksichtigung des Umgebungslichts neu eingestellt werden. Sie können auch noch bei laufendem Versuch verändert werden. Mit Drücken des OK Buttons im SPI-Dialogfenster wird die Aufnahme im Single-Photon-Imaging Modus gestartet. Die Bilddaten werden von ISERFIRE#1 an die Akkumulationsdatei „geliefert“. Während das Makro „SPI“ aktiviert ist, sieht man das Livebild im ISERFIRE#1 Fenster, sowie die Akkumulation der Live-Einzelbilder im Akku-Fenster. In der Slice-Einstellung werden im Livebild die relevanten Photonen mit maximalen Intensitätswerten dargestellt (I=65535). Die gemäß den Limiteinstellungen irrelavanten Ereignisse werden mit niederen Intensitäten angezeigt. Bei Wahl einer entsprechend hohen Slice-Stufe wird dieser Untergrund nicht mehr angezeigt und ausschließlich die relevanten Photonen sind im Livebild zu sehen.

In der Akkumulationsdatei wird für jeden weiteren Treffer die Pixelintensität um 1 erhöht. In Darstellung Slice=0 werden alle Pixel mit mindestens einem Treffer dargestellt. Bei Slice=1 alle Pixel mit einer Intensität größer gleich 2. Bei Slice=2 beträgt die Intensität der darge-

stellten Pixel mindestens I=4. Allgemein erfolgt die Darstellung in Abhängigkeit der gewählten Slice-Stufe n nach der Formel $I = 2^n$.

Im SPI-Modus ist die Aufnahme einer Filmsequenz möglich. Als erster Schritt müssen im ImageManager zwei neue Dateien generiert werden. Die erste Datei, hier mit AKKU bezeichnet, dient der Akkumulation der Einzelbilder. Sie muss vom Typ U32 sein. Bei den weiteren Einstellungen kann die Grundeinstellung von WinSIS übernommen werden. Die zweite Datei, im Folgenden mit SEQ bezeichnet, dient zum Abspeichern der eigentlichen Sequenz. Sie muss ebenfalls vom Typ U32 sein. Die gewünschte Anzahl der Einzelbilder, die zu einer Filmsequenz zusammengefügt werden, wird unter „Number" angegeben. Günstig sind Filme mit 50 bis 200 Einzelbildern. Im Hauptmenüpunkt „Image" wird die Funktion „Copy Cyclic..." aufgerufen. Im Dialogfenster wird die Bilddatei angegeben, aus welcher die Einzelbilder akquiriert werden (Image.IN). Unter „Image.OUT" wird die Bilddatei angegeben, in der die Einzelbilder aus Image.IN zu einer Sequenz zusammengesetzt werden. Die Cycle-Number gibt an, nach wie vielen neuen Bildern in der Image.IN Datei, ihr Inhalt in die Image.OUT Datei geschrieben wird. Bei der Einstellung Cycle-Number = 1 wird jedes Einzelbild der Image.IN Datei in die Image.OUT geschrieben. Anschließend wird das Makro „SPI" gestartet. Dabei wird die Akkumulationsdatei des SPI-Makros als Image.IN Datei deklariert und aus dieser werden die Bilder gemäß der CycleNumber-Einstellung an die Image.OUT weitergegeben. Das Livebild und die akkumulierten Aufnahmen sind sofort auf dem Bildschirm zu sehen, die Filmsequenz kann dagegen erst nach Aufnahme der kompletten Sequenz abgespielt werden.

2. Kurzbedienungsanleitungen:

Kurzanleitung Tisch 1:

JOHANNES GUTENBERG UNIVERSITÄT MAINZ
Institut für Physik

Allgemeines:

- Herstellung der Spannungsversorgung
  (230 V Wechselstrom) via Kaltgerätestecker
- Einschalten der Apparatur am Hauptschalter
  ACHTUNG: Die Laser sind bei eingeschaltetem Hauptschalter in Betrieb;
  NICHT in den Strahl blicken (Laserklasse 2)
- Einstellen der gewünschten Laserleistung mit Hilfe der Potentiometer
  „Laser 1": Doppelspaltversuch
  „Laser 2": Photomultiplierversuch

Versuch 1: Doppelspalt

- Einstellung der gewünschten Spaltbreite und des gewünschten Spaltabstandes mittels Mirkometerschraube
- Ein- bzw. Ausbau der Linse möglich

Versuch 2: Photomultiplier

- Justage des Laserstrahls auf das Eingangsfenster der Photomultiplier-Box
- Anschluss eines Voltmeters an der gelben und der schwarzen Bananenbuchse (Verbindung zu „V control" des Photomultipliers)
- Einstellung der Photomultiplier-Kontrollspannung „V control" mittels des Potentiometers „PM-Steuerung"

Kurzanleitung Tisch 2:

Allgemeines:

- Überprüfung des korrekten Sitzes der

  Filter vor der CCD-Kamera

  Bei Betrieb ohne Schutzfilter kann der Bildverstärker beschädigt werden

- Herstellung der Spannungsversorgung (230 V Wechselstrom) via Kaltgerätestecker
- Einschalten der Apparatur am Hauptschalter

  ACHTUNG: Der Laser ist bei eingeschaltetem Hauptschalter in Betrieb;

  NICHT in den Strahl blicken (Laserklasse 2)

- Anschließen von Maus und Tastatur an den entsprechenden Buchsen der Frontplatte
- Anschließen eines PC-Bildschirms oder eines Beamers

  (Anschluss: „Monitor/Beamer")

- Einschalten des Computers (Druckschalter an der Vorderseite des Rechners)

  WinSIS wird automatisch gestartet.

WinSIS:[97]

- Überprüfung der korrekten Justage der Kamera und Einstellen des gewünschten Bildausschnitts
- Einstellen der gewünschten Laserleistung mit Hilfe des Potentiometer „Laser"
- Auswahl des gewünschten Betriebsmodus

  Live-Aufnahme

  Schnappschuss

  Single-Photon-Imaging (F 10)

  Aufnahme einer Film-Sequenz

  Erstellen eines Projekts

- Einsatz der weiteren Applikationen von WinSIS

  Darstellung in verschiedenen Farbspektren

  Darstellung verschiedener Intensitätsprofile

---

[97] Hinweis: Alle WinSIS Funktionen werden ausführlich in der WinSIS-Hilfe erklärt (F1)

3. Herstellernachweis

Laserdiodenmodule

LAS 63 / 01 – L; maximale Leistung: 1mW; Wellenlänge: 635 nm

Conrad Electronic, Hirschau (www.conrad.de) ; Bestellnummer: 187593-62

Neutrale Graufilter

Transmission : 10% (36-4695); 1% (36-4729); 5% (36-4703);0,05 %(36-4760)

Coherent Deutschland, Dieburg (www.coherent.de)[98]

Bandpassfilter

CWL: 635 nm (42-5421)

Coherent Deutschland, Dieburg (www.coherent.de)

Photomultiplier-Modul

H 5784

Hamamatsu Photonics, Herrsching (www.hamamatsu.de)

Stativmaterial

Spindler&Hoyer[99], (www.spindlerhoyer.de)

Lautsprecher (Aktiv-Boxen)

LS- 28 PC-Lautsprecherset

Conrad Elektronik, Hirschau; (www.conrad.de);Bestellnummer: 994634

Frontplatten

Schaeffer Apparatebau , Berlin (www.schaeffer-apparatebau.de)

Linsen

f = 50 mm

Spindler & Hoyer, (www.spindlerhoyer.de)

Doppelspalte

Mechanische Werkstatt des Instituts für Physik (JoGu-Universität Mainz)

CCD-Kamera

Theta-System Elektronik GmbH, Gröbenzell, (www.theta-system.de)

---

98 Die Firma Coherent Inc. hat ihre Optikabteilung an die Firma Ealing Inc., Rocklin, CA verkauft. Nähere Informationen unter www.ealingcatalog.com

99 Die Firma Spindler&Hoyer wurde von der Firma Linos, Göttingen übernommen.

PC-Programm: WinSIS

Version 6.02 d

Theta-System Elektronik GmbH, Gröbenzell, (www.theta-system.de)

Bildverstärker

Proxitronic, Bensheim (www.proxitronic.de)

Kamera-Objektive

C 1614-M; C 2515-M

Pentax-Cosmicar, Hamburg (www.cosmicar.de)

Graufilter[100]

2fach, 4fach, 8fach, ND 4.0,ND 6.0

Heliopan , Gräfeling (www.heliopan.de)

Profile für Tische, Elektronik-Kästchen

ISEL, Eichenzell (www.isel.de)

Elektronik Layoutprogramm Eagle

CadSoft, Pleiskirchen (www.cadsoft.de)

[100] Zum Aufschrauben auf das Kamera-Objektiv.

4. Elektronik-Layout

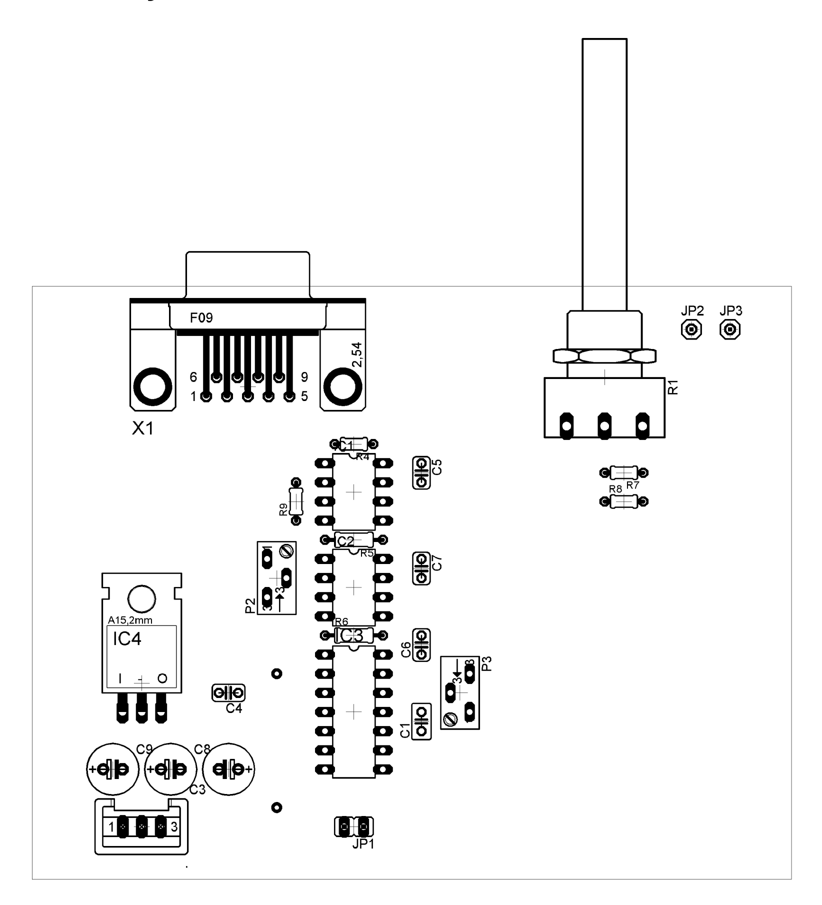


Abbildung 57: Platinenbestückungsplan[101]

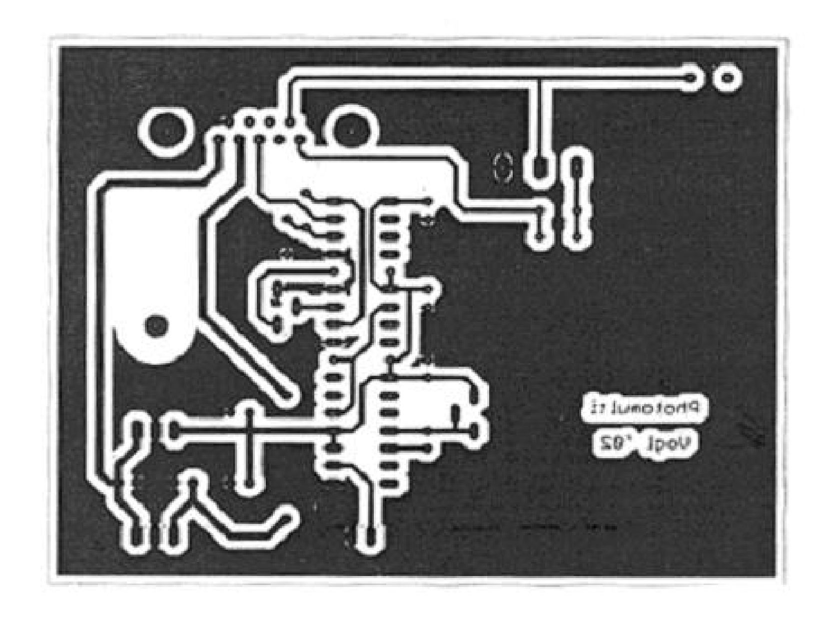


Abbildung 58: Ätzmaske[102]

[101] Erstellt mit dem Programm Eagle 4.0
[102] Erstellt mit dem Programm Eagle 4.0

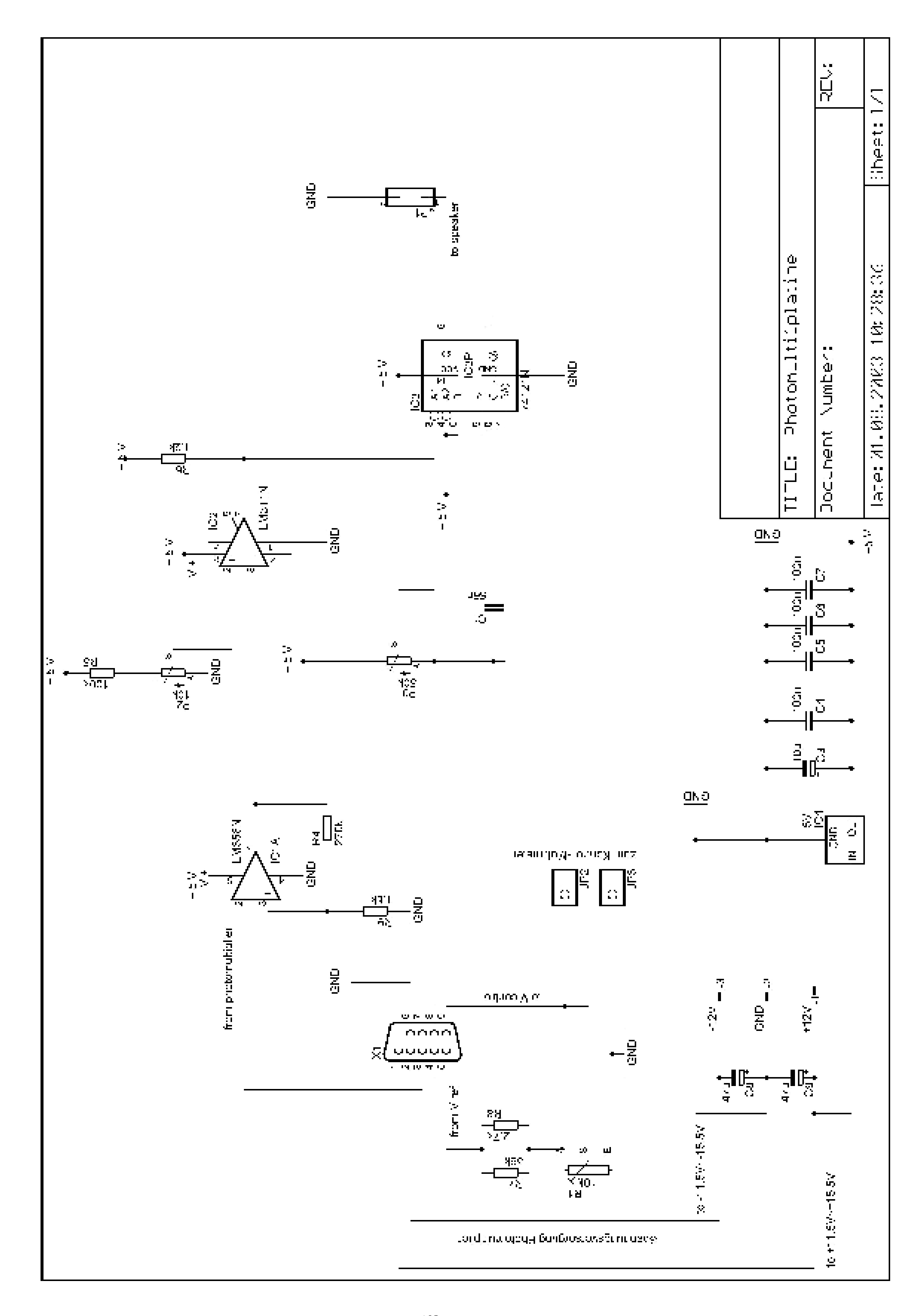


Abbildung 59: Schaltplan Elektronik Tisch 1[103]

[103] Erstellt mit dem Programm: Eagle 4.0

5. Literaturverzeichnis

[Bo58] Bohr, Niels: Atomphysik und menschliche Erkenntnis
Vieweg, Braunschweig, 1958

[BS93]: Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3 Optik
Hrsg.: Heinz Niedrig; Walter de Gruyter; Berlin, New York,1993

[Ge95]: Gerthsen, Christian: Physik
Hrsg.: Helmut Vogel; Springer-Verlag, Berlin,1995

[Ha98]: Hamamatsu: Metal package Photomultiplier Tubes R7400U Series and Subminiature Photosensor Moduls
Hamamatsu Photonics K.K., Shimokanzo/Japan,1998

[He59]: Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie
Ullstein, Frankfurt, 1959

[Hu64]: Huygens, Christian: Abhandlung über das Licht
Hrsg.: Lommel, E.; Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1964

[Ki01]: Kilian, Ulrich: Die Digitalkamera
in: Physikalische Blätter 57 (2001) Nr. 7/8; S.118, Hrsg.: Deutsche Physikalische Gesellschaft; Wiley-VCH, Weilheim, 2001

[Kl92]: Kleinknecht, Konrad: Detektoren für Teilchenstrahlung
Teubner-Verlag, Stuttgart,1992

[Le99]: Lehrplan Physik Sekundarstufe II
Hrsg.: Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, Mainz, 1999

[Le00a]: Leisen, Josef: Quantenphysik/Mikroobjekte
Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II
Hrsg.: Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz, Bad Kreuznach, 2000

[Le00b] Leisen, Josef: Didaktische Vorbemerkungen zur Quantenphilosophie in der Schule, in: Interpretationen der Quantenphysik, S. 171-198, Hrsg.:Rainer Schanz, Hermann Stimm, Institut für Lehrerfort- und –weiterbildung, Mainz, 2000

[Le03]: Lehrplan Physik Gymnasialer Bildungsgang
Hrsg.: Hessisches Kultusministerium, Wiesbaden, 2003

[Ne52]: Newton, Isaac: Opticks;
Dover Publications Inc., New York, 1952

[Mi03] milq: Münchner Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik
Hrsg.: Lehrstuhl der Didaktik der Physik an der LMU München; H. Wiesner et al
www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/

[Ro99]: Roche: Roche Lexikon Medizin
Hrsg.: Hoffmann-LaRoche AG, Urban & Fischer, München, 1999

[Sa02]: Sanyo: Laser Diode
Hrsg.: Sanyo Corp., San Diego CA /USA, 2002

[Si90]: Simonyi,Karoly: Kulturgeschichte der Physik
Verlag Harri Deutsch; Frankfurt /M.,1990

[Ta09]: Taylor, Geoffery I.: Interferenzerscheinungen bei schwachem Licht
Trinity College, 1909; in [Le 00a, S.64]

[Th03]: Theta-System: Datasheet "Single Photon Imaging",
Hrsg.: Theta-SystemElektronik GmbH, Gröbenzell, 2003

[Ti94] Tipler, Paul A.: Physik
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994

[We00] Weis, A; Wynands, R.: Three Demonstration Experiments on the Wave and Particle Nature of Light,
in:Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, Phydid 1/2 (2003), S.67-73;
Hrsg.: H. Litschke et al. , Duisburg-Essen, 2003 (www.phydid.de)

[Yo97] Young, Matt: Optik, Laser, Wellenleiter
Springer-Verlag, Berlin, 1997

6. Abbildungsverzeichnis

7. Impressum

Christian Vogl
Alfred-Nobel-Str.21
55124 Mainz
Geburtsort: Mainz
Matrikelnummer: 2483087
Email: christianvogl@gmx.de

Johannes-Gutenberg Universität Mainz
Fachbereich 18
Institut für Physik
WA Experimentelle Teilchen- und Atomphysik (ETAP)
Staudingerweg 7
55099 Mainz
www.physik.uni-mainz.de

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. H.-G. Sander danke ich für die Betreuung meiner Arbeit und die Möglichkeit ein Thema mit Bezug zu meinem späteren Arbeitsbereich, der Schule, bearbeiten zu können.

Herrn Prof. Dr. K. Kleinknecht danke ich für die Aufnahme in seine Arbeitsgruppe und seinen Einsatz für die Bereitstellung der nicht unerheblichen finanziellen Mittel, die zur Realisation der Experimente von Nöten waren.

Herrn Prof. Dr. L. Köpke danke ich für seine Bereitschaft als Korrektor für diese Arbeit zur Verfügung zu stehen.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Thomas Trefzger, der mich zur Auseinandersetzung mit diesem Thema anregte und während der gesamten Zeit stets ein offenes Ohr für Fragen und Probleme hatte.

Karl-Heinz Geib danke ich für seinen unermüdlichen Einsatz beim mechanischen Aufbau der Versuche. Seine Unterstützung ermöglichte erst die Umsetzung vieler Ideen. Gedankt sei in diesem Zusammenhang auch dem Team der mechanischen Werkstatt des Instituts für die Anfertigung diverser Bauteile.

Bruno Bauss danke ich für die Hilfe bei der Erstellung der Elektronikplatinen. Der Elektronik-Werkstatt gebührt mein Dank für die Bestückung der Platinen, namentlich Frau Barna, Herrn Schuster und dem leider schon verstorbenen stellvertretenden Leiter der Elektronik-Werkstatt Herrn Kuiper.

Herrn Tartacyzk von der Firma Theta-System danke ich für die Unterweisung in das WinSIS System.

Allen ETAP´lern danke ich für die angenehme Atmosphäre in der Arbeitsgruppe. Besonders hervorzuheben ist dabei Frau Silvia Müller, die gute Seele der Arbeitsgruppe.

Ferner danke ich Hubert Veltens und meinen Eltern Renate und Dieter Vogl für ihre Unterstützung und Hilfe bei der Elimination der vielen kleinen Fehler, die sich immer wieder in den Text eingeschlichen haben.

Mein besonderer Dank gilt abschließend zwei Personen:
Zum einen Matthias Fuidl, für die angenehme Bürogemeinschaft, die stete Bereitschaft zur Diskussion über die Arbeit und die Hilfe in mancher Krisenphase.

Zum anderen Bianca Tänzer, für ihre Geduld und Ausdauer alle Höhen und Tiefen der Arbeit mit mir zu teilen.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegeben Hilfsmitteln angefertigt habe und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 15.09.03

____

Christian Vogl